

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

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DE MISTURAS DE AÇOBRITA COM  
SOLOS TROPICAIS TÍPICOS DE MINAS GERAIS EM CAMADAS DE  
BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

**ÍGOR SIQUEIRA MACÊDO**

**ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, Ph.D.**  
**COORIENTADOR: FERNANDO SILVA ALBUQUERQUE, D.Sc.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-313/2018**

**BRASÍLIA/DF: JULHO/2018**

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

ESTUDO DA APLICABILIDADE DE MISTURAS DE AÇOBRIÇA COM  
SOLOS TROPICAIS TÍPICOS DE MINAS GERAIS EM CAMADAS DE  
BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

ÍGOR SIQUEIRA MACÊDO

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

APROVADA POR:



---

LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, Ph.D.(UnB)  
(ORIENTADOR)



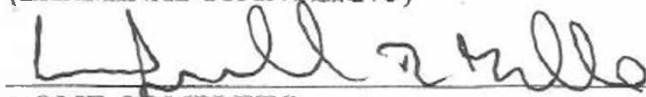
---

FERNANDO SILVA ALBUQUERQUE, D.Sc. (UFS)  
(COORIENTADOR)



---

NOME COMPLETO  
MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)



---

NOME COMPLETO  
LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, D.Sc. (DNIT)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 26 de JULHO de 2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

MACÊDO, ÍGOR SIQUEIRA

Estudo da aplicabilidade de misturas de açobrita com solos tropicais típicos de Minas Gerais em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. [Distrito Federal] 2018

Xxi, 120 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado-Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

Açobrita, base, sub-base, expansão

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MACÊDO, I. S. (2018). Estudo da aplicabilidade de misturas de açobrita com solos tropicais típicos de Minas Gerais em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

## CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: Ígor Siqueira Macêdo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo da aplicabilidade de misturas de açobrita com solos tropicais típicos de Minas Gerais em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

GRAU/ANO: Mestre/2018

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

---

Ígor Siqueira Macêdo

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12, Universidade de Brasília. CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

[igorsm86@hotmail.com](mailto:igorsm86@hotmail.com)

## DEDICATÓRIA

*A Deus, que em todos os momentos esteve ao meu lado.*

*A minha Mãe Maria da Conceição e meu Pai Jair que sempre estiveram presentes nas minhas conquistas, me ajudando a vencer cada obstáculo e ensinando a nunca desistir dos meus objetivos, a minha irmã Fabiane por estar presente me auxiliando na minha vida estudantil, a minha esposa Juliana pelo carinho, companheirismo e cumplicidade nesta caminhada, ao meu querido tio Fábio por sempre estar torcendo por mim e ao meu pequeno Antônio que se tornou a principal razão e motivação para conclusão do meu mestrado.*

*Aos meus avós Terezinha, Jerusa (In memoriam), Valdemar (In memoriam) e Zé Piau (In memoriam) que sempre batalharam para dar todas as condições para meus pais se tornarem a minha referência de vida.*

*A toda a minha família e amigos que direta ou indiretamente participaram desta fase da minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

**A Deus por me dar a vida e saúde para alcança meus objetivos;**

**Ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, aos seus professores e colaboradores por me propiciar a continuidade da minha formação acadêmica.**

**Ao meu orientador e professor Luís Fernando Martins Ribeiro pelos ensinamentos e orientações no desenvolvimento da pesquisa.**

**A equipe da Universidade Federal de Sergipe (UFS) por abrir as portas e auxiliar na realização do programa experimental: meu coorientador professor Fernando Silva Albuquerque, professor Erinaldo Hilário Cavalcante, e em especial as colegas Camila e Kharine e o professor José Willami Santos por me ajudar e acompanhar na execução dos ensaios.**

**Aos meus colegas e amigos de mestrado Roberto e Humberto, e em especial a Thais, pelo companheirismo e grande ajuda durante todo este período até a conclusão do mestrado.**

**Aos meus colegas e amigos do DNIT Rodrigo Português, Leonardo, Carlos, Mario, Luís Heleno e Gustavo Henrique que estiveram ao meu lado neste período de mestrado.**

**Muito obrigado a todos.....**

## RESUMO

O coproduto da indústria siderúrgica gerado durante o processo de produção do aço, o agregado siderúrgico denominado açobrita, foi desenvolvido pela siderurgia a partir das escórias de aciaria, após beneficiamento, onde são realizadas operações de resfriamento controlado, britagem, peneiramento e separação magnética das partes metálicas, enquadramento numa granulometria definida e estabilização volumétrica, processada com finalidade de tornar-se um material eficaz, quando utilizado em substituição ao agregado convencional e diminuir os impactos ambientais gerados pelo processo industrial. Ressalta-se que o estado de Minas Gerais concentra o maior número de parques siderúrgicos do país, destacando-se como a maior produção de aço bruto e conseqüentemente o maior gerador de escória de aciaria nacionalmente. Neste sentido, esta dissertação visa à avaliação da aplicabilidade de misturas de açobrita com solos tropicais típicos de Minas Gerais em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, contribuindo para uma linha de pesquisa desenvolvida por meio de parceria entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, o Instituto Aço Brasil – IABR e a Universidade de Brasília – UnB, que busca avaliar e orientar parâmetros estabelecidos em normativos do DNIT que padronizam o uso sistemático deste produto no Brasil. Para este fim, o programa experimental relativo aos ensaios geotécnicos de laboratório foi definido incluindo a caracterização do açobrita, do solo tropical e de três misturas destes dois, nas proporções: 40% açobrita + 60% solo (M4060), 50% açobrita + 50% solo (M5050) e 60% açobrita + 40% solo (M6040). Além dos ensaios de caracterização, foram determinados os potenciais de expansão do açobrita e das misturas através do método ME – 113 (DNIT, 2009), adaptado do método PTM 130, e verificada a viabilidade econômica da aplicabilidade do açobrita e das misturas em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, através da metodologia preconizada pelo Sistema de Custo Referenciais de Obras (SICRO). Os resultados obtidos mostram a aplicabilidade do açobrita e das misturas, que possuem características e expansibilidade adequadas a utilização em obras rodoviárias e apresentam comportamento desejado quando utilizado com esta finalidade, caracterizando-se, ainda, como um material economicamente mais vantajoso quando comparado com o agregado convencional.

## ABSTRACT

The co-product of the steel industry generated during the production of steel, the steel aggregated called steel-gravel, was developed by the steel industry from steel slag after processing, where operations are made to the controlled cooling, crushing, sieving and magnetic separation of the metallic parts, framed in a defined granulometry and volumetric stabilized, processed in order to become an effective material when used in substitution of the conventional aggregate and reduce the environmental impacts generated by the industrial process. It is noteworthy that the state of Minas Gerais concentrates the largest number of steel parks in the country, standing out as the largest crude steel production and consequently the largest generator of slag nationally. In this sense, this thesis aims at evaluating the applicability of the mixture of steel-gravel and tropical soils typical of Minas Gerais in layers of base and sub-base of road pavements, contributing to a line of research developed through a partnership with between the National Department of Infrastructure of Transport - DNIT, the Brazil Steel Institute - IABR and the University of Brasília - UnB, which seeks to evaluate and guide the parameters established in the DNIT regulations that standardize the systematic use of this product in Brazil. To this end, the experimental program for geotechnical laboratory tests was defined including the characterization of the steel-gravel, the tropical soil as well as the blends of them, in the proportions: 40% steel-gravel + 60% soil (M4060), 50% steel-gravel + 50% soil (M5050) and 60% steel-gravel + 40% soil (M6040). In addition to the testing of characterization, it was determined the potential for expansion of the steel-gravel and the mixtures by the method ME - 113 (DNIT, 2009), adapted from the method PTM 130, and verified the economic viability of applicability of steel-gravel and mixtures in layers of base and subbase of road pavements, through the methodology recommended by the Referential Costs System of Works (SICRO). The obtained results prove the applicability of the steel-gravel and the mixtures, which have characteristics and expansion adequate use on road works and exhibit desired behavior when used for this purpose, further characterize it as an economically more advantageous material when compared to conventional aggregate.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. OBJETIVO GERAL .....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. PRODUÇÃO DO AÇO E A GERAÇÃO DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS.....	4
2.1.1. A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA.....	4
2.1.2. O COPRODUTO SIDERÚRGICO.....	8
2.2. AS ESCÓRIAS DE ACIARIA.....	11
2.2.1. CARACTERÍSTICAS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA .....	11
2.2.2. APLICABILIDADE DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA .....	14
2.2.3. APLICABILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA NA PAVIMENTAÇÃO.....	16
2.2.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE.....	22
2.2.5. MÉTODOS DE CONTROLE DA EXPANSIBILIDADE .....	25
2.2.6. ASPECTOS AMBIENTAIS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA .....	29
2.3. NORMATIVA BRASILEIRA PARA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA EM CAMADAS DE PAVIMENTOS.....	31
3. MÉTODOS E PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	38
3.1. MATERIAIS DA PESQUISA.....	38
3.1.1. AÇOBRITA .....	38
3.1.2. SOLO .....	39
3.1.3. MISTURAS.....	40
3.2. MÉTODOS.....	41
3.2.1. AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	41
3.2.2. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA .....	42
3.2.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	42
3.2.4. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS ( $G_s$ ).....	43
3.2.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	45
3.2.6. CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS–METODOLOGIA MCT.....	45
3.2.7. RESISTÊNCIA À ABRASÃO “LOS ANGELES”.....	48
3.2.8. COMPACTAÇÃO.....	49



3.2.9.	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) .....	50
3.2.10.	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO – MÉTODO ME113 (DNIT, 2009).....	52
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	55
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	55
4.2.	LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	55
4.2.1.	AÇOBRITA .....	55
4.2.2.	SOLO .....	55
4.2.3.	MISTURAS M4060, M5050 E M6040.....	57
4.3.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	57
4.3.1.	AÇOBRITA .....	58
4.3.2.	SOLO .....	61
4.3.3.	MISTURA M4060 .....	64
4.3.4.	MISTURA M5050 .....	66
4.3.5.	MISTURA M6040 .....	68
4.4.	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS .....	69
4.5.	ABSORÇÃO .....	71
4.6.	CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS – METOLOGIA MCT.....	72
4.7.	RESISTÊNCIA À ABRASÃO “LOS ANGELES” .....	76
4.8.	COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA .....	77
4.8.1.	AÇOBRITA .....	77
4.8.2.	SOLO .....	79
4.8.3.	MISTURA M4060 .....	82
4.8.4.	MISTURA M5050 .....	84
4.8.5.	MISTURA M6040 .....	86
4.8.6.	ANÁLISES COMPARATIVAS .....	88
4.9.	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO – MÉTODO ME113 (DNIT, 2009).....	90
4.9.1.	AÇOBRITA .....	90
4.9.2.	MISTURA M4060 .....	93
4.9.3.	MISTURA M5050 .....	95
4.9.4.	MISTURA M6040 .....	97
4.10.	CUSTOS PARA EXECUÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTO COM ESCÓRIA DE ACIARIA.....	100
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	109
5.1.	CONCLUSÕES .....	109

5.1.1.	SOLO TROPICAL .....	109
5.1.2.	AÇOBRITA .....	110
5.1.3.	MISTURAS M4060, M5050 E M6040.....	111
5.2.	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	112
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	114

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxo simplificado de produção do aço (IABR, 2018).....	5
Figura 2.2 – Fluxograma da etapa do refino do aço nas usinas siderúrgicas (Steel Technology, 2018).....	6
Figura 2.3 – Processo de produção do aço nas usinas siderúrgicas (Adaptado SENAI, 2011).....	7
Figura 2.4 – Geração específica de coprodutos e resíduos em kg/t de aço bruto (IABR, 2016).....	8
Figura 2.5 – Destinação de coprodutos e resíduos (IABR, 2016).....	9
Figura 2.6 – Geração de coprodutos e resíduos por tipo (IABR, 2016).....	9
Figura 2.7 – Aplicação das escórias de aciaria e outras escórias (IABR, 2016).....	11
Figura 2.8 – Fluxograma do processo de beneficiamento de escória (Rizzo, 2006).....	13
Figura 2.9 – Aplicação da escória de aciaria mundialmente (Caselato, 2004 <i>Apud.</i> Resende, 2010).....	15
Figura 2.10 – Aplicação da escória de aciaria na Europa (Silva, 2003 <i>Apud.</i> Resende, 2010).....	16
Figura 2.11 – Pátio descoberto de estocagem de escória de aciaria (Raposo, 2005).....	26
Figura 3.1 – Amostras de solo e açobrita.....	39
Figura 3.2 – Materiais e aparelhos utilizados nos ensaios dos limites de Atterberg.....	42
Figura 3.3 – Ensaio de granulometria por sedimentação.....	43
Figura 3.4 – (a) Aparelhos e (b) materiais utilizados nos ensaios de determinação da densidade real dos grãos.....	44
Figura 3.5 – Pentapicnômetro (Pentapyc <sup>TM</sup> 5200e) e sistema de aquisição de dados.....	44
Figura 3.6 – Ensaio de determinação da absorção de água do açobrita.....	45
Figura 3.7 – Preparação da amostra de solo tropical para classificação na metodologia MCT.....	46
Figura 3.8 – Amostra de solo tropical para ensaio de compactação em equipamento miniatura – mini MCV e perda de massa por imersão.....	46
Figura 3.9 – Equipamentos para ensaio de compactação miniatura – mini MCV disponíveis na USP.....	47
Figura 3.10 – Máquina “Los Angeles”.....	48
Figura 3.11 – Preparação do material para ensaios de compactação e ISC.....	49
Figura 3.12 – Soquete CBR/Proctor automática (Soloteste).....	50
Figura 3.13 – Corpos de prova imersos para verificação da expansão.....	51
Figura 3.14 – Prensa CBR/ISC manual 5.000kgf (Solotest).....	51

Figura 3.15 – Calibração da estufa utilizada no ensaio de potência de expansão.....	53
Figura 3.16 – Pré-aquecimento da água para submersão dos moldes.....	53
Figura 3.17 – Amostras preparadas na estufa para ensaios de potencial de expansão.....	54
Figura 3.18 – Moldes com amostras após os 14 dias de expansão.....	54
Figura 4.1 – Gráfico limite de liquidez do solo tropical - ensaio 01.....	56
Figura 4.2 – Gráfico limite de liquidez do solo tropical - ensaio 02.....	56
Figura 4.3 – Curvas granulométricas das amostras de açobrita (apenas com peneiramento).....	59
Figura 4.4 – Curvas granulométricas das amostras de açobrita (granulometria completa).....	59
Figura 4.5 – Curvas granulométricas do solo.....	62
Figura 4.6 – Carta de plasticidade de Casagrande.....	63
Figura 4.7 – Curvas de compactação mini-MCV.....	72
Figura 4.8 – Família de curvas de compactação.....	73
Figura 4.9 – Curva mini-MCV x umidade de compactação.....	74
Figura 4.10 – Curva mini-MCV x perda de massa por imersão.....	75
Figura 4.11 – Classificação metodologia MCT.....	75
Figura 4.12 – Açobrita na graduação A (a) antes e (b) após o ensaio de abrasão “Los Angeles”.....	76
Figura 4.13 – Curva de compactação do açobrita.....	77
Figura 4.14 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC do açobrita.....	78
Figura 4.15 – Curva de compactação do solo tropical.....	80
Figura 4.16 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC do solo tropical.....	81
Figura 4.17 – Curva de compactação da mistura M4060.....	82
Figura 4.18 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC da mistura M4060.....	83
Figura 4.19 – Curva de compactação da mistura M5050.....	84
Figura 4.20 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC da mistura M5050.....	85
Figura 4.21 – Curva de compactação da mistura M6040.....	86
Figura 4.22 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC da mistura M6040.....	87
Figura 4.23 – Curvas de compactação dos materiais ensaiados.....	88
Figura 4.24 – Curvas de índices de vazios das amostras ensaiadas.....	89
Figura 4.25 – Curva de expansão acumulada do açobrita durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).....	91

Figura 4.26 – Amostra de açobrita após ensaio de avaliação do potencial de expansão.....	92
Figura 4.27 – Curva de expansão acumulada da mistura M4060 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).....	94
Figura 4.28 – Amostra da mistura M4060 após ensaio de avaliação do potencial de expansão.....	95
Figura 4.29 – Curva de expansão acumulada da mistura M5050 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).....	97
Figura 4.30 – Amostra da mistura M5050 após ensaio de avaliação do potencial de expansão.....	97
Figura 4.31 – Curva de expansão acumulada da mistura M6040 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).....	99
Figura 4.32 – Amostra da mistura M6040 após ensaio de avaliação do potencial de expansão.....	99
Figura 4.33 – Composição de custo unitário para execução de base ou sub-base estabilizada granulometricamente com solo e escória de aciaria (50%-50%) em usina (DNIT).....	101
Figura 4.34 – Composição de custo unitário para execução de base ou sub-base estabilizada granulometricamente com solo e escória de aciaria (50%-50%) na pista (DNIT).....	101
Figura 4.35 – Composição de custo unitário para execução de base estabilizada granulometricamente com solo e brita (70%-30%) em usina (DNIT).....	102
Figura 4.36 – Composição de custo unitário para execução de base estabilizada granulometricamente com solo e brita (70%-30%) na pista (DNIT).....	102
Figura 4.37 – Composição de custo auxiliar para usinagem de solo e brita (50%-50%) com material de jazida e brita em usina de 300t/h.....	103
Figura 4.38 – Composição de custo unitário para execução de base estabilizada granulometricamente com solo e brita (50%-50%) em usina.....	104
Figura 4.39 – Composição de custo unitário para execução de base estabilizada granulometricamente com solo e brita (50%-50%) na pista.....	105
Figura 4.40 – Composição de custo unitário para execução de base ou sub-base de brita graduada com brita comercial (DNIT).....	105
Figura 4.41 – Composição de custo unitário para execução de base ou sub-base com escória de aciaria.....	106
Figura 4.42 – Pesquisa de preço unitário dos insumos SICRO (DNIT).....	107
Figura 4.43 – Vantagem do agregado siderúrgico pela distância da origem em relação ao agregado convencional.....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química típica das escórias de aciaria geradas nas siderúrgicas brasileiras (IBS, 1999 <i>Apud.</i> Donizetti, 2010).....	12
Tabela 2.2 – Composição mineralógica típica das escórias de aciaria LD (Machado, 2000).....	12
Tabela 2.3 – Comparativo dos percentuais médios dos principais compostos químicos da escória de aciaria no Brasil, Japão e Alemanha (IBS, 1999 <i>Apud.</i> Tarazona, 2016).....	12
Tabela 2.4 – Informações e dados de rodovias construídas ou restauradas utilizando escória de aciaria como agregado na estrutura do pavimento (DER-MG, 2014).....	18
Tabela 2.5 – Parâmetros dos materiais investigados (Parente <i>et al.</i> , 2003).....	20
Tabela 2.6 – Caracterização da escória de aciaria (Barbosa, 2013).....	21
Tabela 2.7 – Caracterização da escória de aciaria (Tarazona, 2016).....	21
Tabela 2.8 – Características das espécies químicas isoladas antes da hidratação (Machado, 2000).....	23
Tabela 2.9 – Parâmetros que influenciam na expansão das escórias de aciaria (Machado, 2000).....	23
Tabela 2.10 – Características dos métodos para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria baseados na ASTM D 698 (ASTM, 2000) e ASTM D 1883 (ASTM, 2005) (Polese, 2007).....	24
Tabela 2.11 – Alguns tratamentos para controle da expansibilidade das escórias de aciaria (Tarazona, 2016).....	27
Tabela 2.12 – Transformações do silicato de cálcio ( $2CaO.SiO_2$ ) em função da temperatura de resfriamento (Machado, 2000).....	28
Tabela 2.13 – Resultados de classificação das escórias de aciaria realizados em diversas pesquisas, utilizando metodologia prescrita na NBR 10.004 (Tarazona, 2016).....	30
Tabela 2.14 – Características exigidas nas normas EM-260 (DNER, 1994) e EM-262 (DNER, 1994) para utilização de escórias de alto-forno e aciaria .....	31
Tabela 2.15 – Faixa granulométrica da escória de aciaria - ES 114 (DNIT, 2009) e ES 115 (DNIT, 2009).....	34
Tabela 2.16 – Características exigidas nas especificações ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009) para utilização de escória de aciaria .....	34
Tabela 2.17 – Faixa granulométrica do solo - ES 114 (DNIT, 2009) e ES 115 (DNIT, 2009).....	34
Tabela 2.18 – Faixa granulométrica para mistura de escória de aciaria e solo - ES 114 (DNIT, 2009) e ES 115 (DNIT, 2009).....	35
Tabela 2.19 – Características exigidas nas especificações ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009) para utilização de mistura de escórias de aciaria e solo.....	35
Tabela 2.20 – Faixa granulométrica do agregado siderúrgico - ES 406 (DNIT, 2017) e ES 407 (DNIT, 2017).....	36

Tabela 2.21 – Características exigidas nas especificações ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017) para utilização de açobrita.....	36
Tabela 2.22 – Faixa granulométrica das misturas (agregado siderúrgico+solo) - ES 406 e ES 407 (DNIT, 2017).....	37
Tabela 2.23 – Características exigidas nas especificações ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017) para utilização de misturas de açobrita e solo.....	37
Tabela 3.1 – Ensaios realizados no açobrita e normas adotadas.....	39
Tabela 3.2 – Ensaios realizados no solo e normas adotadas.....	40
Tabela 3.3 – Ensaios realizados nas misturas e normas adotadas.....	41
Tabela 4.1 – Resultados do limite de liquidez do solo.....	55
Tabela 4.2 – Resultados do limite de plasticidade do solo.....	57
Tabela 4.3 – Análise granulométrica das amostras de açobrita (apenas com peneiramento).....	58
Tabela 4.4 – Análise granulométrica das amostras de açobrita (granulometria completa).....	58
Tabela 4.5 – Resumo da composição e características das amostras de açobrita.....	60
Tabela 4.6 – Análise granulométrica das amostras do solo (granulometria completa).....	61
Tabela 4.7 – Análise granulométrica do solo puro – NBR 6502 (ABNT, 1995).....	62
Tabela 4.8 – Resumo da composição e características das amostras de solo puro.....	63
Tabela 4.9 – Análise granulométrica da mistura M4060.....	64
Tabela 4.10 – Resumo da composição e características das amostras da mistura M4060.....	65
Tabela 4.11 – Análise granulométrica da mistura M5050.....	66
Tabela 4.12 – Resumo da composição e características das amostras da mistura M5050.....	67
Tabela 4.13 – Análise granulométrica da mistura M6040.....	68
Tabela 4.14 – Resumo da composição e características das amostras da mistura M6040.....	69
Tabela 4.15 – Resumos dos ensaios para determinação da densidade real dos grãos ME-093 (DNER, 1994).....	70
Tabela 4.16 – Resumos das análises para determinação da densidade real dos grãos de açobrita com Pentapicnômetro.....	70
Tabela 4.17 – Resumos das análises para determinação da densidade real dos grãos das misturas de açobrita e solo tropical com Pentapicnômetro.....	71
Tabela 4.18 – Resultados das determinações de absorção de água do açobrita.....	71
Tabela 4.19 – Resultados mini-MCV e massa específica aparente seca das amostras.....	73
Tabela 4.20 – Retas médias para determinação dos índices $c'$ e $d'$ .....	73
Tabela 4.21 – Resultados mini-MCV e perda de massa por imersão.....	74
Tabela 4.22 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC do açobrita.....	78

Tabela 4.23 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC do solo tropical.....	80
Tabela 4.24 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC da mistura M4060.....	82
Tabela 4.25 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC da mistura M5050.....	85
Tabela 4.26 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC da mistura M6040.....	87
Tabela 4.27 – Resumo dos ensaios de compactação e ISC dos materiais.....	88
Tabela 4.28 – Resultados dos ensaios de expansão do açobrita.....	90
Tabela 4.29 – Taxa de expansão acumulada do açobrita durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).....	91
Tabela 4.30 – Resultados dos ensaios de expansão da mistura M4060.....	93
Tabela 4.31 – Taxa de expansão acumulada da mistura M4060 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).....	93
Tabela 4.32 – Resultados dos ensaios de expansão da mistura M5050.....	95
Tabela 4.33 – Taxa de expansão acumulada da mistura M5050 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).....	96
Tabela 4.34 – Resultados dos ensaios de expansão da mistura M6040.....	98
Tabela 4.35 – Taxa de expansão acumulada da mistura M6040 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).....	98
Tabela 4.36 – Resumo dos custos calculado para execução de camadas de base ou sub-base..	106



## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

### SÍMBOLOS

$\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	Óxido de Alumínio
C.....	Carbono
$\text{CaCO}_3$ .....	Carbonato de Cálcio ou Calcita ou Aragonita
$\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$ .....	Dolomita
$\text{CaF}_2$ .....	Fluorita
$\text{CaO}$ .....	Óxido de Cálcio ou Cal Livre
$\text{Ca(OH)}_2$ .....	Hidróxido de Cálcio ou Portlandita
$\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$ .....	Gelenita
$\text{Ca}.\text{Mg}(\text{SiO}_3)_2$ .....	Diopsita
$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ .....	Mervinita
$2 \text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	Ferrita Dicálcica
$3 \text{CaO}.\text{SiO}_2$ .....	Silicato Tricálcico
$4 \text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	Brown Millerita
$\alpha - 2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ .....	Silicato Dicálcico ou Bredigita
$\beta - 2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ .....	Silicato Dicálcico ou Larnita
$\text{CO}_2$ .....	Dióxido de Carbono
$\text{C}_2\text{S}$ .....	Silicato Dicálcico
F.....	Flúor
Fe.....	Ferro
$\text{Fe}^0$ .....	Ferro Metálico
$\text{FeO}$ .....	Óxido de Ferro ou Wüstita
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	Hematita
$\text{Fe}_3\text{O}_4$ .....	Magnetita
$\text{FeCO}_3$ .....	Siderita
$\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{H}_2\text{O}$ .....	Limonita
$\text{Fe(OH)}_2$ .....	Hidróxido Ferroso
$\text{FeO(OH)}$ .....	Geotita
$\text{FeS}_2$ .....	Pirita
$\text{g/cm}^3$ .....	Gramas por Centímetro Cúbico
kg.....	Quilograma

kg/t.....	Quilograma por Tonelada
km.....	Quilometro
MgO.....	Óxido de Magnésio ou Periclásio
MgO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	Óxidos de Alumínio e Magnésio
β - 2MgO.SiO <sub>2</sub> .....	Silicato de Magnésio
Mg(OH) <sub>2</sub> .....	Hidróxido de Magnésio ou Brucita
m <sup>3</sup> .....	Metro Cúbico
mm.....	Milímetro
Mn.....	Manganês
MnO.....	Óxido de Manganês
MnO <sub>2</sub> .....	Dióxido de Manganês
MPa.....	MegaPascal
P.....	Fósforo
pH.....	Potencial Hidrogeniônico
S.....	Enxofre
Si.....	Silício
SiO <sub>2</sub> .....	Dióxido de Silício
t.....	Tonelada
t/h.....	Tonelada por Hora
t/m <sup>3</sup> .....	Tonelada por Metro Cúbico
tkm.....	Tonelada Quilometro
°C.....	Graus Celsius
γs.....	Peso Específico Real dos Grãos

## NOMENCLATURA E ABREVIATURAS

AASHTO.....	American Association of State Highway and Transportation Officials
AB.....	Açobrita
ABCP.....	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABM.....	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI.....	American Iron and Steel Institute
ASTM.....	America Society of Testing Materials
BG.....	Brita Graduada
BGS.....	Brita Graduada Simples
BGTC.....	Brita Graduada Tratada com Cimento
BOF.....	Blast Oxygen Furnace
CAP.....	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR.....	California Bearing Ration
CBUQ.....	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCABrasil.....	Centro de Coprodutos Aço Brasil
Cc.....	Coefficiente de Curvatura
CEN.....	European Committee for Standardization
CGEE.....	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CIRIA.....	Construction Industry Research and Information Association do Reino Unido
CLA.....	Classificação
CONAMA.....	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COSIPA.....	Companhia Siderúrgica Paulista
CP.....	Corpo de Prova
CP-II-E.....	Cimento Portland de Composto com Escória
CP-III.....	Cimento Portland de Alto-forno
CSN.....	Companhia Siderúrgica Nacional
CST.....	Companhia Siderúrgica Tubarão
Cu.....	Coefficiente de Uniformidade
DER-MG.....	Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais
DETR.....	Department of the Environment Transport and Regions do Reino Unido
DIN.....	Deutsches Institut für Normung
DNER.....	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT.....	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
D <sub>10</sub> .....	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 10% passante em peso
D <sub>30</sub> .....	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 30% passante em peso
D <sub>60</sub> .....	Diâmetro das partículas ou grãos de solo correspondente a 60% passante em peso
D <sub>máx</sub> .....	Malha da peneira na qual ficou retido o percentual acumulado igual ou imediatamente inferior a 5%
EAF.....	Electric Arc Furnace
EB.....	Especificação Brasileira
EGAF.....	Escórias Granuladas de Alto-forno
EM.....	Especificação de Material
EOF.....	Electric Optimizing Furnace
EPA.....	Environmental Protection Agency
EPUSP.....	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ER.....	Eficiência Relativa
ES.....	Especificação de Serviço
EUA.....	Estados Unidos da América
FHWA.....	Federal Highway Administration do Estado Unidos da América
G <sub>s</sub> .....	Densidade Real dos Grãos
IABR.....	Instituto Aço Brasil
IBRAM.....	Instituto Brasileiro de Mineração
IG.....	Índice de Grupo
IP.....	Índice de Plasticidade
IPR.....	Instituto de Pesquisa Rodoviária
ISC.....	Índice de Suporte de Califórnia
ISO.....	Internacional Organizativo for Standardization
JIS.....	Japan Institute Standard
LA.....	Grupo de Solos Lateríticos Areia
LA'.....	Grupo de Solos Lateríticos Arenoso
LD.....	Linz e Donawitz
LG'.....	Grupo de Solos Lateríticos Argilosos
LL, w <sub>L</sub> .....	Limite de Liquidez
LP, w <sub>p</sub> .....	Limite de Plasticidade
M.C.T.....	Miniatura, Compactado, Tropical
ME.....	Método de Ensaio
MG.....	Minas Gerais - Brasil

ML.....	Solo Siltoso de Baixa Plasticidade
MR.....	Módulo de Resiliência
M4060.....	Mistura composta por 40% de açobrita e 60% de solo, em peso, respectivamente
M5050.....	Mistura composta por 50% de açobrita e 50% de solo, em peso, respectivamente
M6040.....	Mistura composta por 60% de açobrita e 40% de solo, em peso, respectivamente
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
N.....	Número equivalente de operações do eixo rodoviário padrão
NA.....	Grupo de Solos Não Lateríticos Areia
NBR.....	Norma Brasileira
NG' .....	Grupo de Solos Não Lateríticos Argilosos
NP.....	Não plástico
NS' .....	Grupo de Solos Não Lateríticos Siltosos
NSA.....	National Slags Association
OCDE.....	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OH.....	Open Heart
PennDOT.....	Pennsylvania Department of Transportation
PPG.....	Programa de Pós-Graduação
PRO.....	Procedimento
PTM.....	Pennsylvania Testing Method
SICRO.....	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SP.....	Solo Puro
Sr.....	Saturação
SUCS.....	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFS.....	Universidade Federal de Sergipe
UnB.....	Universidade de Brasília
USP.....	Universidade de São Paulo
TRB.....	Transportation Research Board
TSD.....	Tratamento Superficial Duplo

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO

A indústria siderúrgica fornece matéria-prima para fabricação de diversos produtos presentes no nosso cotidiano, o que a torna cada dia mais fundamental para existência humana. Matéria-prima utilizada em setores como: construção civil, automotivo, bens de capital, máquinas e equipamentos (incluindo agrícolas), utilidades domésticas e comerciais. Esta forte presença da siderurgia interfere direta e indiretamente na forma como os seres humanos comunicam-se, locomovem-se e até alimentam-se.

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2018), o Brasil em 2017 bateu recorde de produção de alguns bens minerais, dentre eles o minério de ferro, com um total de 430.000.000 toneladas. Essa grande produção impulsiona a atividade siderúrgica, a qual por sua vez gera uma grande quantidade de resíduos que podem prejudicar o meio ambiente, se não descartados de forma correta. Com o intuito de reduzir os custos de deposição e minimizar os riscos ambientais tem-se buscado alternativas para destinação mais sustentável destes resíduos; uma delas estaria relacionada a sua transformação em coprodutos, dando aos resíduos uma nova destinação e minimizando o volume a ser descartado.

Os principais coprodutos e resíduos gerados neste tipo de atividade são as escórias de alto-forno e escórias de aciaria, pós e lamas oriundos do sistema de controle atmosférico. Desta forma, materiais que seriam descartados em aterros podem tornar-se matéria-prima para pavimentação de estradas, obras de infraestrutura ferroviárias, corretivo de solo, fabricação de cimento, materiais cerâmicos, etc.

De acordo com o Instituto Aço Brasil (IABR, 2018), de abril de 2017 a abril de 2018, o Brasil produziu 34,8 milhões de toneladas de aço bruto. Dado que cada tonelada de aço gera de 100 a 150 kg de escória de aciaria e adotando-se a média de 130kg de escória, alcança-se uma produção de aproximadamente 4,5 milhões de toneladas de escória nestes doze meses. Neste sentido de janeiro a abril deste ano produziu-se aproximadamente 11,6 milhões de toneladas de aço bruto, dos quais aproximadamente 9,5 milhões foram produzidos nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, concentrando mais de 80% da produção total, sendo o estado de Minas Gerais o maior produtor, com 30,9% do total produzido no período.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2016), a malha rodoviária brasileira é de 1.720.755,7 km; deste total apenas 211.468,3 km é pavimentada, o que corresponde a aproximadamente 12,30% do total de malha rodoviária, sendo que o estado de Minas Gerais possui a maior malha rodoviária total, 280.134,4 km dos quais 245.088,3 km não é pavimentada. Esta condição representa uma grande preocupação, dado a baixa qualidade dos pavimentos, que aumentam os custos operacionais, a insegurança e riscos no transporte rodoviário.

Neste sentido, sabendo-se do grande potencial das obras rodoviárias em absorver resíduos, devido ao grande volume de material empregado nestas obras, associado, ainda, à capacidade de transformação de um potencial passivo ambiental da indústria siderúrgica, diante da escassez de recursos naturais, seja pelas restrições ambientais referentes à exploração de jazidas, seja pela localização destas, este trabalho tem por finalidade contribuir com os estudos para utilização de agregados siderúrgicos em pavimentos rodoviários, diminuindo a utilização de recursos não renováveis e contribuindo para a sustentabilidade do planeta. Constituindo de uma linha de pesquisa resultante da parceria entre DNIT, Instituto Aço Brasil - IABR e instituições acadêmicas.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GERAL**

- ✓ O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a aplicabilidade de misturas do coproduto da indústria da siderurgia, o açobrita, com solos tropicais, como elemento constituinte de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

No contexto dos objetivos específicos ressalta-se os seguintes:

- Realizar caracterização do açobrita, solo tropical e da mistura de açobrita e solo tropical utilizados na pesquisa.
- Verificar os custos de utilização de açobrita e da mistura de açobrita com solo tropical em pavimentos rodoviários, visando avaliar a competitividade econômica do agregado siderúrgico.

- Examinar o comportamento do açobrita misturado com solo tropical, em diferentes proporções, a fim de avaliar o potencial de utilização do coproduto, tornando-o economicamente competitivo frente a outros agregados convencionais.

### **1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO**

Para cumprir os objetivos traçados, dividiu-se a dissertação em 5 capítulos: introdução, revisão bibliográfica, métodos e planejamento experimental, apresentação e análise dos resultados e, por fim, conclusões e recomendações.

O capítulo de introdução trata-se de um contexto geral da questão da geração do coproduto siderúrgico no Brasil e seu potencial de aproveitamento, após lista-se os objetivos principais e específicos, e por fim qual escopo da dissertação, dissertando-se a respeito da estrutura de cada capítulo.

No capítulo de revisão bibliográfica, detalha-se os assuntos referentes a produção do aço e geração dos respectivos coprodutos, definindo-os e descrevendo potencial de aproveitamento deles, prosseguindo com caracterização, apresentação da aplicabilidade e descrição de métodos de controle e avaliação do potencial de expansão das escórias de aciaria. Apresenta-se ainda uma série de normativos brasileiros vinculados direta ou indiretamente a utilização das escórias de aciaria em pavimentos rodoviários. Este capítulo é finalizado com um estudo comparativo entre os custos de execução de camadas de pavimento com agregado siderúrgico e com agregado convencional.

Em métodos e planejamento experimental, discutiram-se os métodos e planejamento experimental adotado na pesquisa e apresenta-se uma descrição da origem dos materiais utilizados.

No capítulo de apresentação e análise dos resultados são apresentadas, além dos resultados obtidos na etapa experimental, as análises, comparações e avaliações da aplicabilidade do agregado siderúrgico (açobrita) misturado com solo tropical como material constituinte de camadas de base e sub-base em pavimentos rodoviários.

O quinto e último capítulo finaliza a dissertação com as conclusões a respeito do estudo e também faz considerações a cerca de propostas e sugestões para futuros trabalhos.

Ao final da dissertação são listadas as referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento da pesquisa.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. PRODUÇÃO DO AÇO E A GERAÇÃO DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS

#### 2.1.1. A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

Tradicionalmente define-se o aço como uma liga metálica composta fundamentalmente de ferro e carbono. O ferro é encontrado em toda crosta terrestre, no estado sólido, sob a forma de minério de ferro, fortemente associado ao oxigênio e a sílica. Para extração e produção de ferro, os minérios de ferro comumente utilizados são os óxidos de ferro, em especial as hematitas ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) e limonita ( $\text{FeO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Além destes, pode-se encontrar em abundância a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) que, contudo, não pode ser utilizada para manufaturar aço, uma vez que o enxofre altera importantes propriedades do ferro e do aço.

Já o carbono pode ser encontrado sob diversas formas e também é relativamente abundante na natureza. Na indústria siderúrgica utiliza-se o carvão mineral, em alguns casos, o carvão vegetal. Neste processo industrial para fabricação do aço, o carvão exerce duplo papel, seja como combustível, permitindo alcançar altas temperaturas (cerca de  $1.500^\circ$  Celsius) necessárias à fusão do minério, seja como redutor, associando-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. Tal processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono chama-se redução e ocorre dentro de equipamentos chamados altos-fornos.

A fabricação do aço pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação (Figura 2.1). Com a finalidade de melhorar o rendimento e gerar uma economia no processo, o minério de ferro e o carvão são previamente preparados antes de serem levados ao alto-forno. Para tanto, enquanto o carvão é destilado nas coquearias para obtenção do coque e retirada de compostos voláteis, grande parte do minério de ferro (finos) é aglomerado e transformado em pelotas utilizando-se cal e finos de coque, resultando no chamado sinter e subprodutos carboquímicos. Todo este processo é denominado de preparação da carga ou sinterização.

Na redução, essas matérias-primas agora preparadas, são carregadas no alto-forno, juntamente com fundentes, dando origem ao ferro gusa ou ferro de primeira fusão.

Nesta etapa, o oxigênio aquecido a uma temperatura de  $1000^\circ\text{C}$  é soprado pela parte de baixo do alto-forno. O carvão, em contato com o oxigênio, produz calor que funde a carga metálica e

dá início ao processo de redução do minério de ferro em um metal líquido: o ferro-gusa ou ferro de primeira fusão. O gusa é uma liga de ferro e carbono com um teor de carbono muito elevado. Além do gusa também é gerada a escória de alto-forno na forma líquida, a qual é separada do gusa por diferença de densidade. Esta escória composta por impurezas como calcário e sílica serve de matéria-prima para a fabricação de cimento.

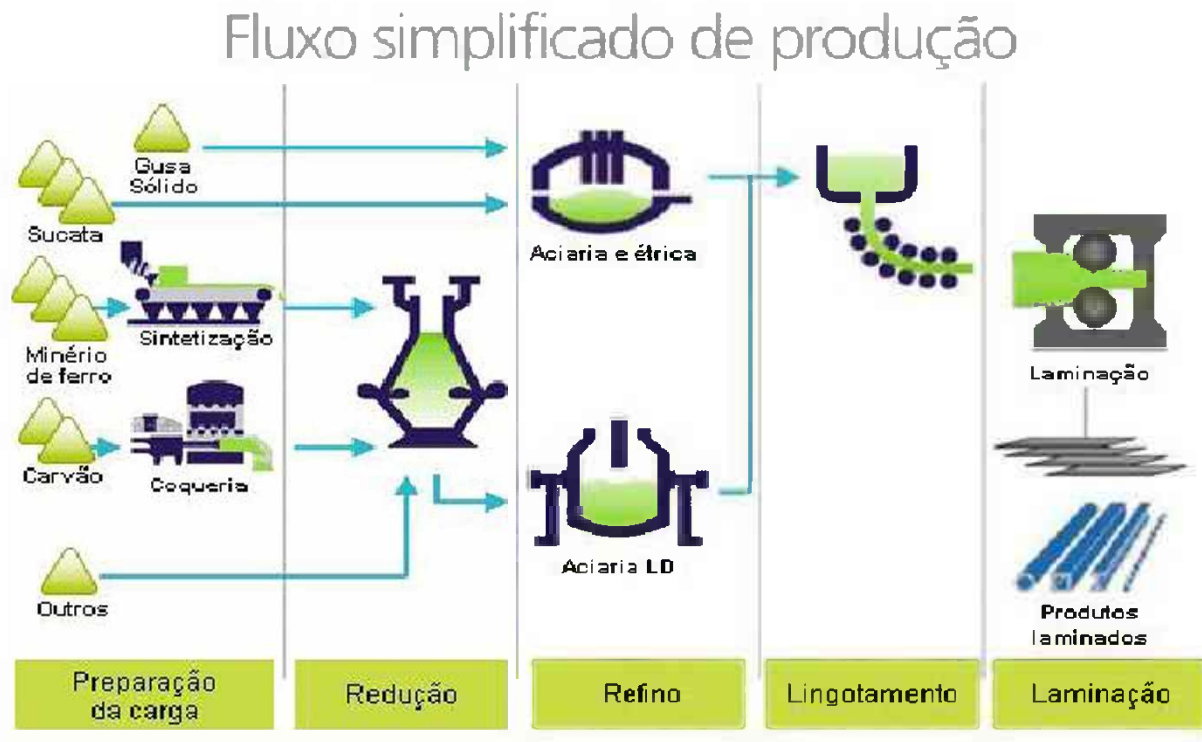


Figura 2.1 – Fluxo simplificado de produção do aço (IABR, 2018).

Posteriormente dá-se início a etapa de refino (Figura 2.2). Nesta etapa, o ferro gusa em estado líquido ou sólido e a sucata de ferro ou aço são levados para aciarias, a oxigênio ou elétricas, para serem transformados em aço líquido, mediante queima de impurezas e adições.

Esta etapa do processamento na aciaria divide-se em refino primário e refino secundário. O refino primário acontece no conversor a oxigênio ou elétrico, onde o ferro-gusa geralmente adicionado à sucata de aço é transformado em aço. Nesta fase, o Silício (Si), o Manganês (Mn), e principalmente o Carbono (C) são removidos. No refino secundário são feitas as correções mais específicas e controladas (Tarazona, 2016).

Dentro da etapa do refino, basicamente existem quatro processos para fabricação do aço, caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o Siemens-Martin (“*Open Heart*” - OH), o conversor a oxigênio (“*Linz e Donawitz*” - LD ou “*Blast Oxygen Furnace*” - BOF), o

forno elétrico a arco (“*Electric Arc Furnace*” - EAF) e, atualmente, encontra-se os fornos de energia otimizada (“*Energy Optimizing Furnace*” - EOF).

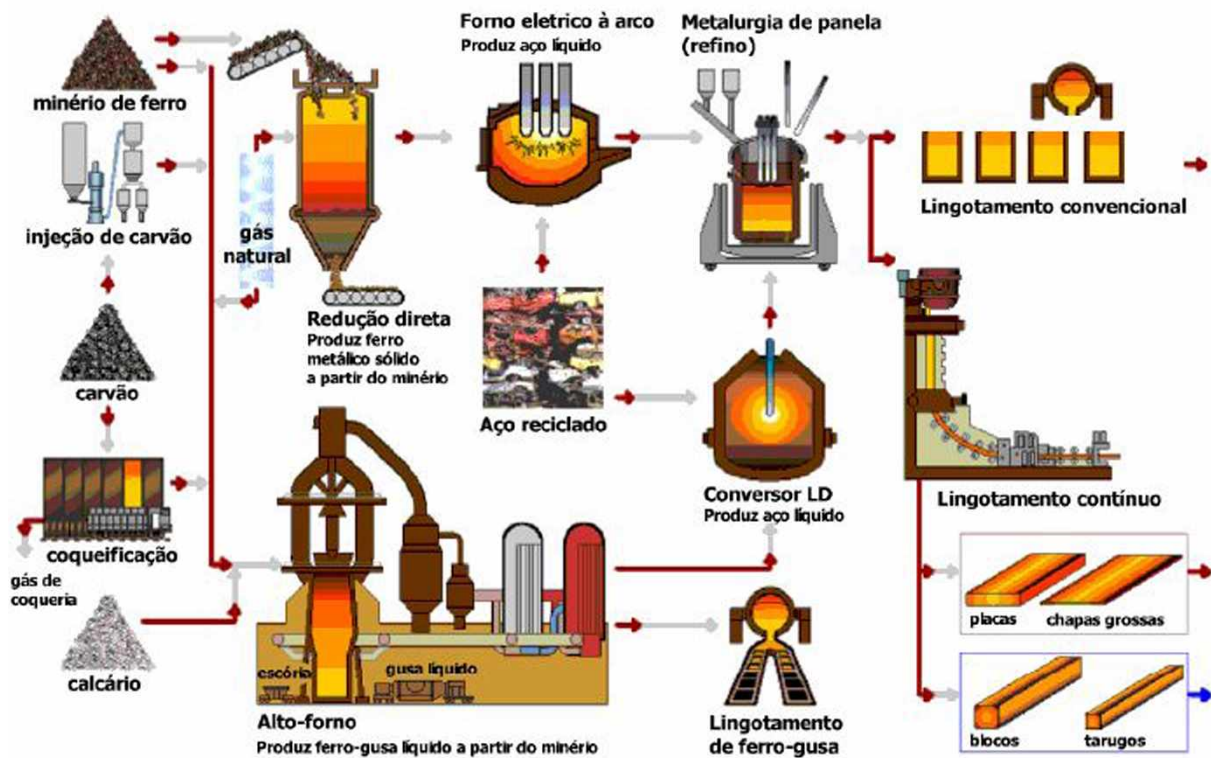


Figura 2.2 – Fluxograma da etapa do refino do aço nas usinas siderúrgicas (Steel Technology, 2018).

Os dois processos mais utilizados mundialmente são o de fusão e refino de sucata em fornos elétricos a arco e o refino de ferro-gusa líquido em conversores a oxigênio (Rohde, 2002). O conversor básico a oxigênio (basic oxygen furnace, BOF) é o tipo de aciaria mais utilizada na siderurgia mundial. Esta tecnologia foi originalmente desenvolvida em meados do século passado pela siderúrgica austríaca Vöest-Alpine. Pelo fato de ter sido empregada inicialmente nas usinas Linz e Donawitz, ela ficou também conhecida como aciaria LD. Atualmente, cerca de 2/3 da produção mundial de aço é baseada em aciaria LD. No Brasil, cerca de 75% a 80% da produção de aço bruto provém de conversores LD. Já a aciaria elétrica (EAF) tem mantido uma participação em torno de 20% a 25% da produção nacional de aço, configurando uma menor taxa de difusão frente à indústria mundial de 30% a 35% (CGEE, 2010).

A quarta e última fase do processo de produção do aço é a laminação, inicialmente pelo resfriamento e solidificação do aço em estado líquido, processo conhecido como lingotamento. Em seguida o aço é transformado em produtos finais, onde em processo de solidificação é deformado mecanicamente por equipamentos chamados laminadores e transformado em

produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras, etc.

A Figura 2.3 ilustra as classificações mundialmente utilizadas para as usinas siderúrgicas segundo o processo produtivo: Integradas a coque (Integrated mill), que usam alto-forno para produção de ferro-gusa, posteriormente transformado em aço nos conversores básicos a oxigênio e Semi-integradas (Minimill), cuja fase inicial de produção é a aciaria elétrica.

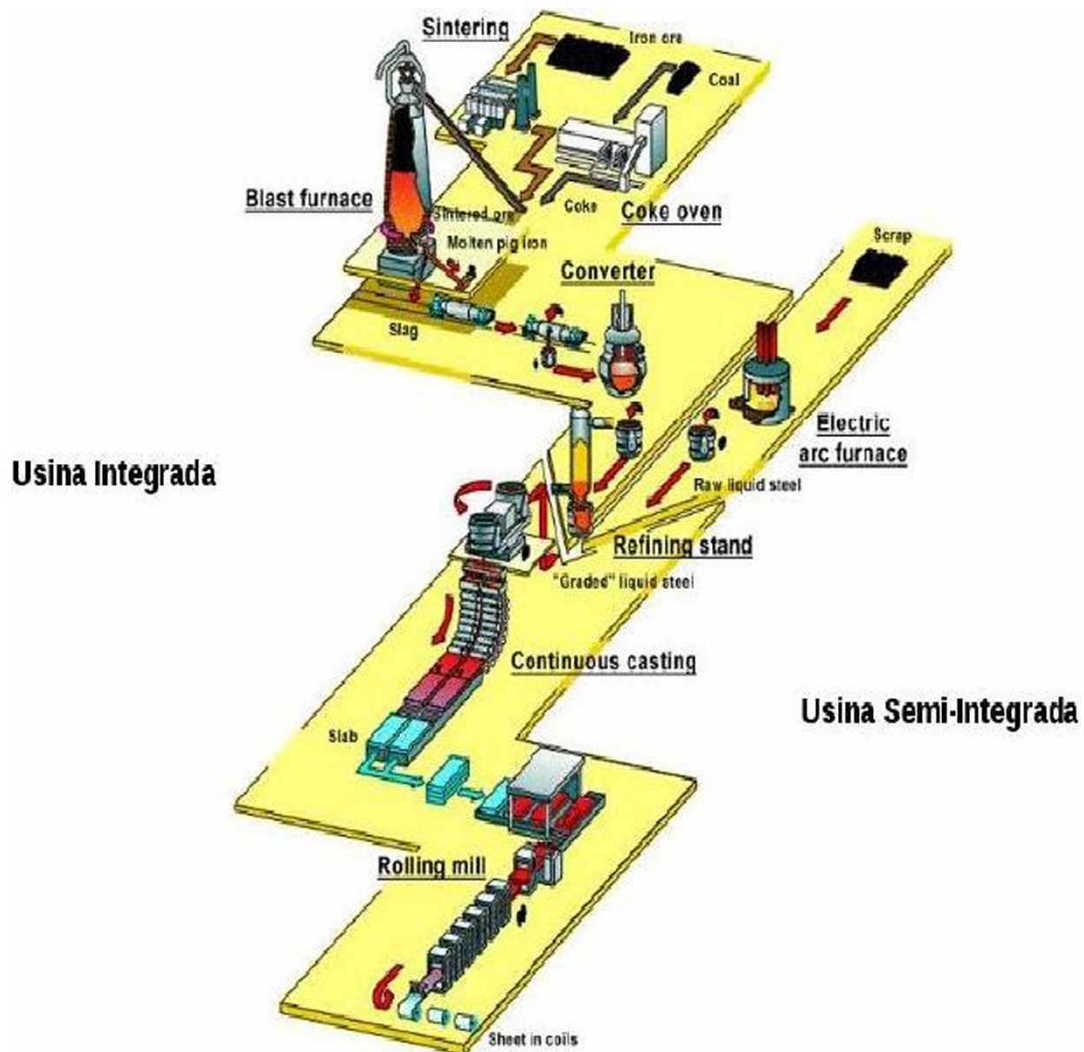


Figura 2.3 – Processo de produção do aço nas usinas siderúrgicas (Adaptado SENAI, 2011).

As usinas Integradas operam três fases básicas: redução, refino e laminação, ou seja, participam de todo processo produtivo do aço. As Semi-integradas operam apenas duas fases: refino e laminação, estas utilizam o ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica, adquiridos de terceiros, para transformá-los em aço, em aciarias elétricas.

### 2.1.2. O COPRODUTO SIDERÚRGICO

Os coprodutos são materiais que, juntamente com o aço, resultam do processo siderúrgico e para os quais foram desenvolvidas tecnologias para sua utilização de forma ambientalmente adequada como matéria-prima ou fonte de energia na própria atividade geradora ou por terceiros. O uso de coprodutos contribui para a sustentabilidade da indústria do aço, evitando a disposição de resíduos em aterros, reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub> e preservando os recursos naturais não renováveis.

Os principais coprodutos e resíduos gerados na indústria siderúrgica são escórias de alto-forno e de aciaria, pós e lamas oriundos de sistemas de controle atmosférico. Na indústria do aço praticamente tudo transforma-se; materiais que seriam descartados em aterros tornam-se matéria-prima para pavimentação de estradas, corretivo de solo, fabricação de cimento, materiais cerâmicos etc.

Considerando que as relações de produção de coprodutos por tonelada de aço bruto produzido, foram de 599 e 594 kg, nos anos de 2014 e 2015, respectivamente (Figura 2.4). Neste sentido o total de coprodutos e resíduos diretos produzidos foi de 20,2 milhões de toneladas em 2014 e 19,8 milhões de toneladas em 2015, reaproveitados especialmente na produção de cimento, para uso agrônômico e no nivelamento de terrenos e aterros (IABR, 2016).

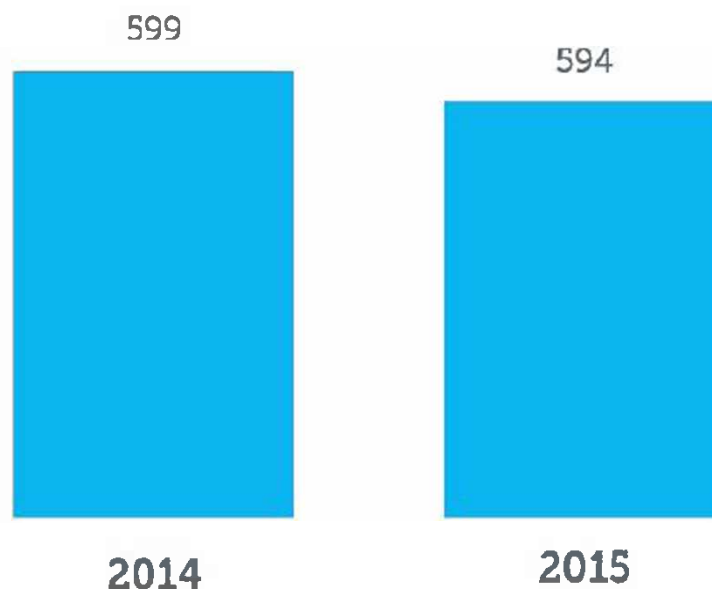


Figura 2.4 – Geração específica de coprodutos e resíduos em kg/t de aço bruto (IABR, 2016).

Desta produção, segundo o Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil de 2016 (IABR, 2016), 87,00 % foi reaproveitado no ano de 2014 e 88,00 % no ano de 2015 (Figura 2.5).

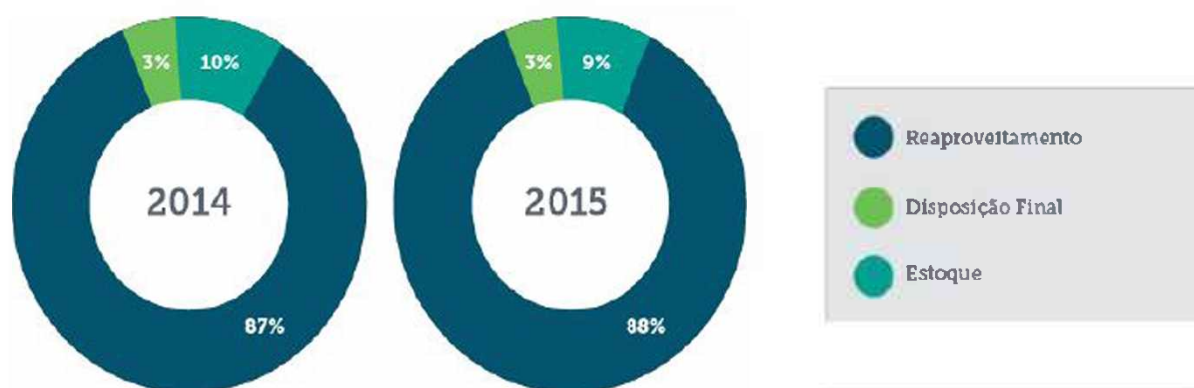


Figura 2.5 – Destinação de coprodutos e resíduos (IABR, 2016).

Deste total de coprodutos gerados, a grande maioria diz respeito às escórias de alto-forno e de aciaria, representando 43,0% para o primeiro e 28,0 % para o segundo, no ano de 2015 (Figura 2.6).

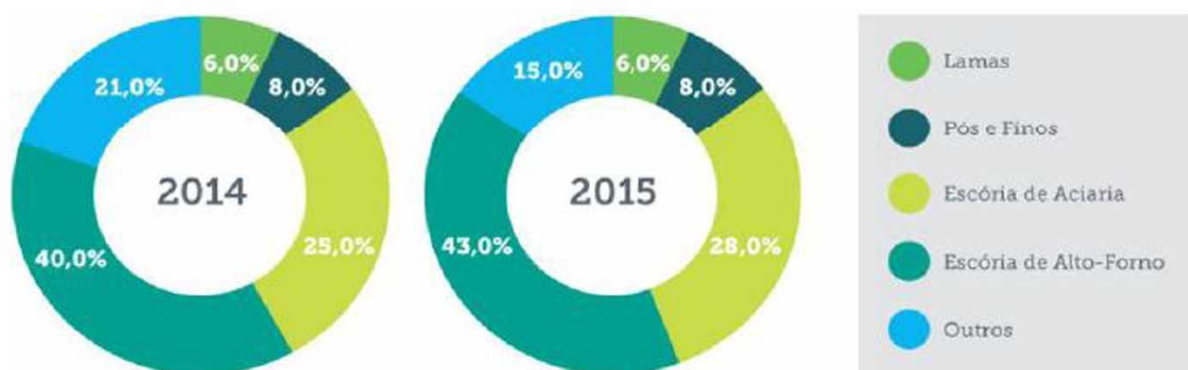


Figura 2.6 – Geração de coprodutos e resíduos por tipo (IABR, 2016).

Como as escórias representam mais de 60% dos coprodutos gerados pelo processo produtivo, encontrar alternativas para agregação de valor a estes materiais constitui-se no principal foco de atuação da indústria siderúrgica.

A escória de alto-forno é um resíduo siderúrgico industrial obtida no processo de produção do ferro gusa nos altos-fornos das usinas. A escória passa por um processo de granulação e beneficiamento para ser disponibilizada ao mercado, constituído basicamente de alumínio-silicatos cálcicos. Aproximadamente 99,00% da escória de alto-forno são destinadas a indústria do cimento, sendo, desta forma, totalmente consumida como matéria-prima em outros ciclos produtivos.

Sob o ponto de vista ambiental, a utilização da escória de alto-forno na produção de cimento em substituição ao clínquer é extremamente benéfica, uma vez que reduz em cerca de 50% (em

média) as emissões de CO<sub>2</sub>, economiza energia, preserva as paisagens naturais, além de conservar os recursos minerais.

A escória de aciaria é um resíduo gerado no processo de produção e refino do aço, formada em fornos elétricos ou conversores a oxigênio através da conversão do ferro gusa e sucata de aço. Este material é constituído de diversos elementos químicos que não interessam estar presentes na produção do aço. Após seu resfriamento, beneficiamento e controle de qualidade, passa a ser classificada como agregado siderúrgico podendo ser aplicada principalmente em lastros ferroviários, sub-bases, bases e capas asfálticas de pavimentos rodoviários, estradas vicinais, gabiões, rip-raps, corretivos e fertilizantes de solos.

As escórias de aciaria são compostos formados a partir de adições de CaO (Óxido de Cálcio ou Cal livre), de uma fonte de MgO (Óxido de Magnésio ou Periclásio) e CaF<sub>2</sub> (Fluorita), cuja finalidade é absorver os óxidos resultantes da reação do oxigênio insuflado no processo com as impurezas (P, S, Mn, C, etc.). A escória de aciaria é rica em CaO, MgO e SiO<sub>2</sub> (Dióxido de Silício), tornando-se um material com características expansivas (Castelo Branco, 2004).

Dependendo dos processos utilizados na fabricação do aço, a escória de aciaria pode ser classificada como oxidante ou redutora (Freitas, 2007):

- ✓ Escória Oxidante: coproduto originado das reações de oxidação dos elementos de carbono, fósforo e silício resultante da injeção de oxigênio no aço fundido (refino oxidante). Este tipo de escória é formado nos processos LD, EAF e OH.
- ✓ Escória Redutora: coproduto gerado após o vazamento da escoria oxidada, onde se adiciona elementos de liga juntamente com o óxido de cálcio (CaO) e a fluorita (CaF<sub>2</sub>) com o objetivo de promover a dessulfuração do aço fundido. Este tipo de escória é originado na etapa secundária do refino realizado no forno-panela, sendo formada apenas pelo processo EAF.

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

Segundo o Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil de 2016 (IABR, 2016), a utilização das escórias de aciaria como base e sub-base de estradas e nivelamento de terrenos e

aterros, representou 81,0% em 2014 e 87,0% em 2015, sendo estas as principais utilizações da escória de aciaria no Brasil (Figura 2.7).

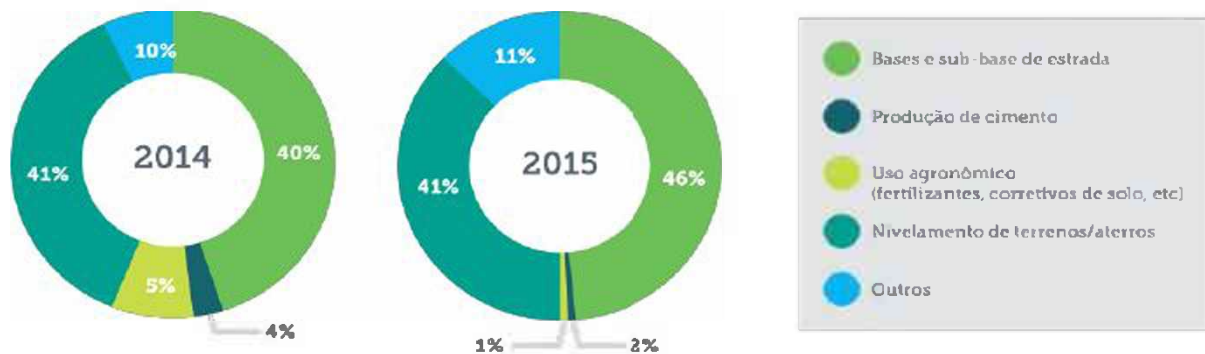


Figura 2.7 – Aplicação das escórias de aciaria e outras escórias (IABR, 2016).

## 2.2. AS ESCÓRIAS DE ACIARIA

### 2.2.1. CARACTERÍSTICAS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

A escória de aciaria é um coproduto originado no processo de produção do aço. Portanto, é constituído por uma mistura de óxidos de cálcio e de magnésio, silicatos de cálcio, ferro metálico, além de outras espécies químicas que aparecem em menor escala. No final do processo de refino, após a oxidação do fósforo e do silício, parte da cal e do magnésio presentes na escória precipitam ao ultrapassar os limites de solubilidade da escória fundida. O fato explica os elevados teores de CaO e MgO reativos presentes na escória. Do ponto de vista mineralógico, as escórias de aciaria são compostas, em média, por  $\beta$ - silicato dicálcico (larnita), ferrita cálcica, wüstita (FeO), cal livre (CaO), periclásio (MgO), portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>) e calcita (CaCO<sub>3</sub>), entre outras espécies químicas (Machado, 2000).

A grande variação na composição química e mineralógica das escórias de aciaria pode ocorrer em função da matéria-prima e do processo de produção empregado na produção do aço. Ocorre variação de composição das escórias produzidas em diferentes países e até mesmo em siderúrgicas do mesmo país ou que utilizam o mesmo processo produtivo. As espécies químicas identificadas na escória de aciaria são consequência das variações ocorridas nos processos de refino do aço, na forma de resfriamento da escória e na sua armazenagem após o resfriamento.

A Tabela 2.1 mostrada a composição química típica das escórias de aciaria geradas nas principais siderúrgicas brasileiras, que utilizam fornos LD ou BOF.



Tabela 2.1 – Composição química típica das escórias de aciaria geradas nas siderúrgicas brasileiras (IBS, 1999 *Apud.* Donizetti, 2010).

Usinas	Composição química escória de aciaria BOF ou LD (%)							
	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	Fe (total)	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
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	-	1,80
USIMINAS	41,40	6,20	1,40	11,00	6,30	22,00	-	-
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 2.2 é mostrada a composição mineralógica típica das escórias de aciaria LD.

Tabela 2.2 – Composição mineralógica típica das escórias de aciaria LD (Machado, 2000).

Fase mineral	Fórmula	Ponto de fusão (°C)
Silicato dicálcico – Larnita ( $\beta$ -C <sub>2</sub> S)	$\beta - 2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	2130
Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)	$3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	1900
Silicato de magnésio	$\beta - 2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	-
Ferrita dicálcica	$2 \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	1430
Mervinita	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	-
Diopsita	$\text{Ca Mg}(\text{SiO}_3)_2$	-
Brown millerita	$4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	1410
Bredigita	$\alpha - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	-
Gelenita	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	-
Óxidos de alumínio e magnésio	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	-
Wüstita (óxido de ferro)	FeO	-
Periclásio (óxido de magnésio)	MgO	2800
Óxido de cálcio	CaO	2570

A Tabela 2.3 apresenta um comparativo entre os percentuais médios dos principais compostos químicos da escória de aciaria produzida no Brasil, Japão e Alemanha.

Tabela 2.3 – Comparativo dos percentuais médios dos principais compostos químicos da escória de aciaria no Brasil, Japão e Alemanha (IBS, 1999 *Apud.* Tarazona, 2016).

Elementos químicos (%)	País		
	Brasil	Japão	Alemanha
Óxido de cálcio (CaO)	23 – 46	42 – 44	48 – 54
Óxido de magnésio (MgO)	5 – 13	3 – 7	1 – 4
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	11 – 15	11 – 14	11 – 18
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,8 – 4	1 – 2	1 – 4
Ferro total (Fe)	14 – 22	18 – 21	14 – 19

A Figura 2.8 apresenta o fluxograma do processo de beneficiamento da escória realizado nas siderúrgicas brasileiras. No fluxo de beneficiamento são realizadas as operações de resfriamento controlado, britagem, peneiramento e separação magnética da parte metálica,

classificação granulométrica e estabilização volumétrica. Este processamento da escória tem por finalidade tornar o material eficaz, quando utilizado em substituição ao agregado convencional.

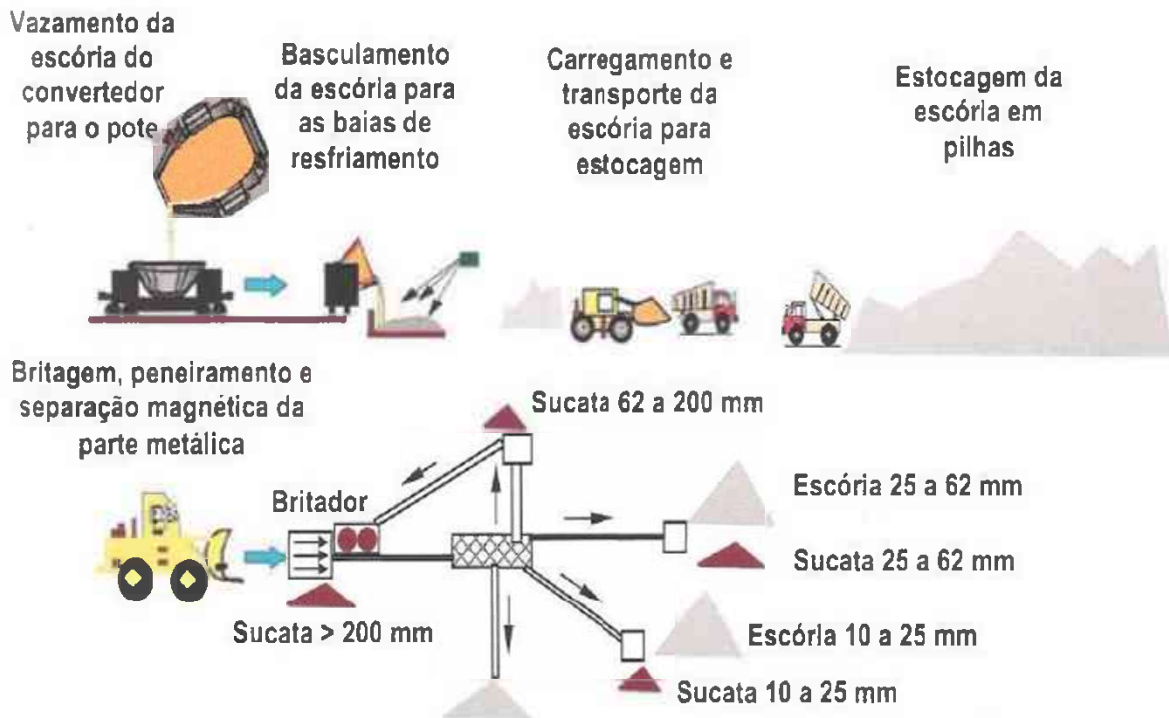


Figura 2.8 – Fluxograma do processo de beneficiamento de escória (Rizzo, 2006).

A etapa do resfriamento da escória de aciaria tem grande influência na eficiência do processo de beneficiamento e nas características físicas do material. Inicialmente é realizada de forma acelerada com intuito de reduzir o tamanho dos blocos de agregados, facilitando as etapas seguintes de britagem, peneiramento e separação magnética. A depender da forma como é realizado o resfriamento ocorre variação em características com a densidade, granulometria e propriedades estruturais das escórias de aciaria, podendo ocorrer grandes variações na composição das escórias, mesmo quando produzidas na mesma siderúrgica.

No processo lento de esfriamento ao ar ocorre a solidificação dos grãos em decorrência da cristalização dos óxidos que compõe a escória, esta condição tem como resultado escórias de superfície rugosa e estrutura vesicular. No processo de resfriamento rápido, com utilização de vapor ao ar, formam-se escórias porosas e de baixa densidade devido à expansão sofrida pelos grãos. No processo de resfriamento brusco com jato d'água seguido de resfriamento em tanque com água, forma-se uma escória granular vítrea, com estrutura porosa e textura áspera (Tarazona, 2016).

As escórias de aciaria apresentam a característica da 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 importantíssima pois, além de melhorar as demais características mecânicas da camada compactada, propicia um comportamento estrutural semelhante ao das estruturas rígidas ou semirrígidas. Quimicamente, a hidraulicidade é o fenômeno que ocorre quando a água, em contato com a escória, reage com pequeníssima quantidade de  $\text{CaO}$  e  $\text{SiO}_2$ , formando uma película de hidratos na superfície da escória. Em atmosfera alcalina, ocorre a formação de hidratos contendo  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , cuja combinação transforma a escória num material de alta dureza. (Rohde, 2002).

### **2.2.2. APLICABILIDADE DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA**

Estudos e pesquisas já realizadas no Brasil e em outros países demonstraram concreta possibilidade de utilização dos coprodutos gerados nos processos da siderurgia em setores como a indústria da construção civil, pavimentação, indústria cerâmica, agricultura, fabricação de cimento e artefatos de concreto.

Das aplicabilidades e vantagens na utilização das escórias verificadas atualmente destaca-se:

- produção de cimento, onde desde 1991 são acrescentados percentuais de escória de alto-forno na sua confecção. Segundo o Centro de Coprodutos Aço Brasil (CCABrasil), a escória é utilizada em cimentos normatizados como o CP II-E - Cimento Portland composto com escória (NBR 11578 – ABNT, 1997) que leva em sua composição de 6 a 34% de escória de alto-forno e o CP III - Cimento Portland de Alto-Forno (NBR 5735, ABNT, 1991) que leva em sua composição de 35 a 70% de agregado siderúrgico de alto-forno. Além das características especiais e o uso para toda e qualquer obra, os cimentos com acréscimo de escória propiciam benefícios ambientais, devido à substituição de clínquer por escória de alto-forno e, conseqüentemente, reduz a emissão de  $\text{CO}_2$  e o consumo de recursos naturais não renováveis (jazidas de calcário);
- lastro de ferrovias, substituindo a pedra britada nº 3 e ajudando na prevenção dos recursos naturais não renováveis. Proporcionando maior resistência mecânica, permitindo perfeita drenagem da água e dando maior estabilidade a plataforma;
- revestimento eficiente para estradas vicinais, propiciando alta resistência mecânica e ao desgaste, com um baixo custo;

- obras de proteção e contenção como gabiões e rip-rap, dando maior estabilidade à contenção, devido ao seu peso próprio que é cerca de 70% maior do que apresentado pelo material pétreo, além de reduzir o consumo de recursos naturais;
- pavimentação, onde é uma excelente opção de material para utilização na sub-base, base e capa asfáltica de um pavimento asfáltico em substituição à brita, devido às suas propriedades e ótima relação custo x benefício. Proporciona excelente resistência mecânica, o que significa uma maior durabilidade em relação a outros materiais, ante uma mesma intensidade de carga e espessura, um melhor desempenho do pavimento considerando sua textura rugosa e alta cubicidade, uma capacidade de carga elevada e alta resistência ao desgaste. Possibilita, ainda, uma redução da espessura do pavimento e menor custo comparado a qualquer outro material com características similares.

Uma das grandes vantagens da escória de aciaria é a possibilidade de serem 100% trituradas atingindo a granulometria desejada, permitindo melhor trabalhabilidade e compactação, favorecendo assim a durabilidade do pavimento. (Rohde, 2002).

Segundo Resende (2010) a utilização da escória de aciaria nos países em geral, se comparado ao Brasil, ocorre de maneira mais equacionada (Figura 2.9). Nestes países verifica-se uma maior utilização na confecção de base de estradas e preparação de terrenos/aterros, assim como também ocorre no Brasil (Figura 2.7).

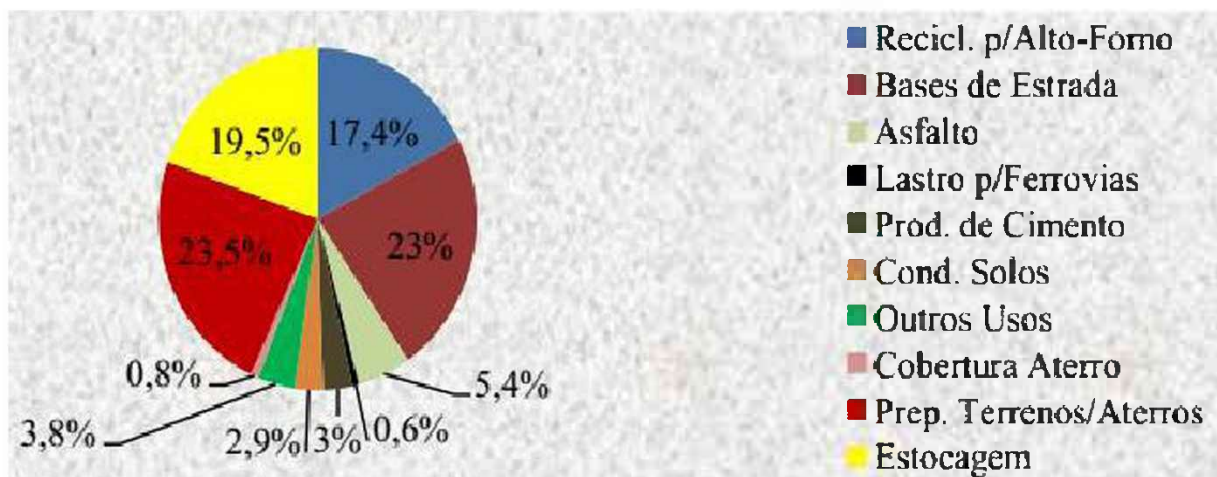


Figura 2.9 – Aplicação da escória de aciaria mundialmente (Caselato, 2004 *Apud.* Resende, 2010).

Resende (2010) apresenta dados da aplicabilidade da escória de aciaria nos países europeus (Figura 2.10), classificando a aplicação com bem racionalizada, com um sistema de aproveitamento bastante eficaz. A principal aplicação da escória de aciaria nos países europeus,

a construção de estradas, apresenta valores percentuais muito semelhantes ao praticado atualmente no Brasil (Figura 2.7).



Figura 2.10 – Aplicação da escória de aciaria na Europa (Silva, 2003 *Apud*. Resende, 2010).

### 2.2.3. APLICABILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA NA PAVIMENTAÇÃO

Motta e Freitas (2008) relatam o aproveitamento de escória de aciaria em vários países, (Inglaterra, Alemanha, Polônia, França, Japão, etc), desde o início do século XX para diversas finalidades.

Um dos marcos para aplicabilidade de resíduos no mundo foi o relatório publicado pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) em 1977. No relatório os resíduos foram agrupados em 5 categorias: resíduos e subprodutos provenientes de minas e pedreiras, resíduos e subprodutos provenientes da indústria metalúrgica, resíduos e subprodutos industriais, resíduos urbanos e resíduos e subprodutos agrícolas. No relatório os resíduos ou subprodutos tiveram sua valorização segundo critérios técnicos, econômicos e ambientais. Estabeleceu-se então, critérios como: quantidade de resíduos ou subprodutos gerados deveria ser superior a  $50 \times 10^3$  toneladas, a distância entre a produção e a utilização deveria ser aceitável, realização de estudos de eventual toxicidade e da solubilidade de alguns compostos dos resíduos. De acordo com os critérios e conforme as possibilidades técnicas de utilização, estes resíduos eram classificados em quatro categorias (I a IV), onde a classe I pertencia os resíduos com melhor potencial de utilização, em estado natural ou com ligeiro tratamento (como por exemplo as escórias de aciaria, cinzas volantes, entre outros). A classe IV pertencia aos resíduos que apresentassem pouca ou nenhuma possibilidade de utilização na construção rodoviária. Vinte anos depois da publicação do primeiro relatório, a OCDE publicou um segundo

documento onde foram atualizados os conhecimentos existentes sobre as valorizações realizadas e entre outras coisas, estabeleceu uma classificação das tecnologias de reciclagem atendendo ao êxito atingido com cada uma delas (Ferreira, 2010).

Ainda de acordo com Ferreira (2010), em 1999 no Reino Unido, a Associação de Pesquisa e Informação da Indústria da Construção Civil/Departamento do Meio Ambiente, Transportes Regiões (*Construction Industry Research and Information Association/Department of the Environment, Transport and Regions*, CIRIA/DETR) publicou um documento intitulado *The reclaimed and recycled construction materials handbook* no qual contempla o potencial de utilização dos resíduos com possibilidades de aproveitamento na construção dos pavimentos. Em 2002, a Administração Federal dos Pavimentos dos Estados Unidos da América (*Federal Highway Administration*, FHWA) apresentou num simpósio internacional os resultados obtidos em numerosos estudos realizados sobre o aproveitamento dos resíduos na construção de pavimentos. Dos estudos realizados foi possível elaborar as recomendações para os utilizadores de resíduos e subprodutos (*User guidelines for waste and by-products materials in pavement construction*).

No Brasil existem dados de utilização de escória de aciaria em pavimentação desde a década de 70. Silva et al. (2002) relatam que o uso de escória de aciaria tem apresentado bons resultados no Espírito Santo, como exemplo, citam mais de 100 km de pavimentação urbana realizada em 1986, com escória de aciaria na base e sub-base, que após 14 anos de tráfego intenso apresentava-se em bom estado. Citam, ainda, a aplicação de escória como agregado em bases, sub-bases e pré-misturados a frio em Vila Velha nos anos de 1992 e 2000.

Carvalho Filho (2006) relata que em 1994, no município de Praia Grande/SP, a prefeitura utilizou escória de aciaria em obras de 1.200.000 m<sup>2</sup> de ruas, inclusive em camadas asfálticas.

Em Minas Gerais, onde está localizado o maior número de parques siderúrgicos do país, sendo 9 das 29 usinas siderúrgicas existentes no Brasil, o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG, 2014) tem estudado e aplicado escória de aciaria de diversas fontes e com características físicas e mecânicas distintas. Na maioria das vezes o uso dessas escórias foi bem-sucedido, consistindo em ótimas soluções técnicas e econômicas. O bom desempenho da escória de aciaria aplicada em pavimentos no estado pode ser verificado a partir dos dados emitidos pelo DER-MG através de Nota Técnica de 14 de novembro de 2014, na qual são apresentadas informações e situação das rodovias onde foi empregado agregado siderúrgico no estado de Minas Gerais (Tabela 2.14).

Tabela 2.4 – Informações e dados de rodovias construídas ou restauradas utilizando escória de aciaria como agregado na estrutura do pavimento (Adaptado, DER-MG, 2014).

1	<b>Rodovia:</b>	MG/320	<b>Empresa:</b>	Carioca Engenharia S/A
	<b>Extensão:</b>	5,7 km	<b>Trecho:</b>	Entr. BR/381 – Jaguarauçu
	<b>Data da Obra:</b>	Novembro/1981	<b>Subtrecho:</b>	-
	<b>VMD:</b>	400 veículos	<b>Obra:</b>	Pavimentação
<b>Situação:</b>	A escória foi utilizada como material granular de base, com espessura de 20cm, sob revestimento de TSD. Desde então não foi realizada qualquer intervenção no trecho e, somente agora, em outubro/2014, está sendo realizado recapeamento com CBUQ, sendo uma camada regularizadora de 2cm com motoniveladora e 3cm com acabadora.			
2	<b>Rodovia:</b>	BR/381	<b>Empresa:</b>	Construtora Barbosa Melo S/A
	<b>Extensão:</b>	16,0 km	<b>Trecho:</b>	Divisa ES/MG – Belo Horizonte
	<b>Data da Obra:</b>	Junho/2006	<b>Subtrecho:</b>	Contorno de Coronel Fabriciano
	<b>VMD:</b>	12.000 veículos	<b>Obra:</b>	Implantação e pavimentação
<b>Situação:</b>	A escória foi utilizada como material granular de sub-base e base, com espessura de 30cm, sob revestimento de duas camadas 5cm de CBUQ.			
3	<b>Rodovia:</b>	AMG/900	<b>Empresa:</b>	EMPA – Empresa de Pavimentação Ltda.
	<b>Extensão:</b>	5,0 km	<b>Trecho:</b>	Entr. BR/458 - Ipaba
	<b>Data da Obra:</b>	Novembro /1998	<b>Subtrecho:</b>	-
	<b>VMD:</b>	400 veículos	<b>Obra:</b>	Implantação e pavimentação
<b>Situação:</b>	A escória foi utilizada como material granular de sub-base e base, com espessura de 30cm, sob revestimento de TSD. Desde então não foi realizada qualquer intervenção no trecho e a estrutura do pavimento se apresenta com bom comportamento. Em avaliação realizada em junho/2014, constatou-se a necessidade de executar uma nova camada de revestimento, considerando que o TSD se encontra bastante desgastado e já apresenta trechos com desagregação das camadas de brita.			
4	<b>Rodovia:</b>	MG/232	<b>Empresa:</b>	Consenge – Construções e serviços de Engenharia Ltda.
	<b>Extensão:</b>	20,2 km	<b>Trecho:</b>	Santana do Paraíso - Mesquita
	<b>Data da Obra:</b>	Março /2008	<b>Subtrecho:</b>	-
	<b>VMD:</b>	700 veículos	<b>Obra:</b>	Melhoramento e pavimentação
<b>Situação:</b>	A escória foi utilizada como material granular de sub-base e base, com espessura de 20cm, misturada com argila na proporção de 15%, sob revestimento de TSD. Desde então não foi realizada qualquer intervenção no trecho e a estrutura do pavimento se apresenta com bom comportamento.			
5	<b>Rodovia:</b>	LMG/823	<b>Empresa:</b>	Comax Construtora Ltda
	<b>Extensão:</b>	13,9 km	<b>Trecho:</b>	Entr. BR/116 (Inhapim) – São Domingos das Dores
	<b>Data da Obra:</b>	Abril/2007	<b>Subtrecho:</b>	-
	<b>VMD:</b>	500 veículos	<b>Obra:</b>	Melhoramento e pavimentação
6	<b>Rodovia:</b>	LMG/823	<b>Empresa:</b>	Seisan Engenharia e Construções Ltda.
	<b>Extensão:</b>	5,3 km	<b>Trecho:</b>	Entr. BR/116 (Inhapim) – São Domingos das Dores
	<b>Data da Obra:</b>	Agosto/2006	<b>Subtrecho:</b>	-
	<b>VMD:</b>	400 veículos	<b>Obra:</b>	Melhoramento e pavimentação
<b>Situação:</b>	A escória foi utilizada como material granular de sub-base e base, com espessura de 20cm, misturada com argila na proporção de 30%, sob revestimento de TSD. Desde então não foi realizada qualquer intervenção no trecho e a estrutura do pavimento se apresenta com bom comportamento.			

7	<b>Rodovia:</b>	LMG/759	<b>Empresa:</b>	Fidens Engenharia Ltda
	<b>Extensão:</b>	35,8 km	<b>Trecho:</b>	Entr. BR/458 – Pingo d'água
	<b>Data da Obra:</b>	Junho/2012	<b>Subtrecho:</b>	-
	<b>VMD:</b>	900 veículos	<b>Obra:</b>	Implantação e pavimentação
<b>Situação:</b>	A escória foi utilizada como material granular de sub-base e base, com espessura de 30cm, misturada com argila na proporção de 11%, sob revestimento de duas camadas de 5cm de CBUQ. O pavimento se apresenta em ótimas condições, sem qualquer problema aparente.			
8	<b>Rodovia:</b>	LMG/759	<b>Empresa:</b>	Construtora Preart Ltda.
	<b>Extensão:</b>	16,6 km	<b>Trecho:</b>	Pingo d'água – Córrego Novo
	<b>Data da Obra:</b>	Janeiro/2010	<b>Subtrecho:</b>	-
	<b>VMD:</b>	500 veículos	<b>Obra:</b>	Implantação e pavimentação
<b>Situação:</b>	A escória foi utilizada como material granular de sub-base e base, com espessura de 30cm, misturada com argila na proporção de 20%, sob revestimento de duas camadas de 5cm de CBUQ. O pavimento se apresenta em ótimas condições, sem qualquer problema aparente.			

Alvarenga (2001) lista obras com escória de aciaria na 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), ruas de Volta Redonda, Resende, Barra do Pirai, Itaguaí, Barra Mansa, Magé, todas no RJ e Mogi das Cruzes (SP), vias no interior da Arcelor Mittal Tubarão e revestimentos primários na região Sul Fluminense.

Além destas, IPR (1988) cita as seguintes obras com escória:

- São Domingos do Prata/MG, em 1978, utilizado na camada de base da sede municipal à BR-262, com extensão de 9 km;
- Salvador/BA, pavimentação urbana com 300 mil toneladas de escória de aciaria utilizada na camada de base, revestimentos e recapeamentos no período de 1979 a 1983;
- Ipatinga – Governador Valadares-MG, em 1986 e 1987, 300 mil toneladas de escória nas camadas de base, regularização, binder e capa asfáltica, concreto dos drenos, canaletas e meio-fio;
- No trecho de Resende-RJ da Via Dutra;
- Rodovia do Sol no estado do Espírito Santo, no leito de aterro como camada drenante;
- Aeroporto de Vitória-ES, na camada de base;

Lima et. al. (2000) comparam três pavimentos, dois com escória de aciaria do tipo LD e um com BGS (Brita Graduada Simples) e BGTC (Brita Graduada Tratada com Cimento) nas camadas de base e sub-base. A avaliação foi feita com a Viga Benkelman e retroanálise pelo programa RETRAN5-L. As camadas de escória apresentaram módulos de resiliência retroanalizados de três a quatro vezes maiores que os de BGS. No pavimento de TSD



(Tratamento Superficial Duplo) e escória, a deflexão máxima média foi 37% superior ao do pavimento de CBUQ.

Rohde (2002) executou ensaios em escória de aciaria EAF granulometricamente corrigida para que se enquadrasse na faixa C do DNIT, avaliou características físicas (abrasão *Los Angeles*, densidade real, durabilidade e potencial de expansão) e mecânica (I.S.C. e módulo de resiliência). Determinou-se perda por abrasão *Los Angeles* superior a 36%, densidade real dos grãos variando entre 3,39 e 5,51 e ISC da ordem de 200%.

Parente *et al.*, (2003) avaliaram o comportamento mecânico de misturas de solo com escória de aciaria e solo com brita, a partir de resultados de ensaios triaxiais cíclicos (MR) e Índice de Suporte Califórnia (ISC), estudaram misturas nas proporções 50:50% e 30:70% (solo: agregado). Analisaram ainda potencial de expansão da escória pelo método PTM 130 adaptada para DMA-1/DER-MG (DER-MG, 1982) e baseado na norma ASTM D4792 (ASTM, 1995), obtendo-se expansão volumétrica acumulada de 0,34% ao 7º dia e 0,61% no 14º dia. Concluiu-se que o valor de CBR para mistura solo-escoria é em média 3 vezes maior que do solo puro e em média, o dobro dos valores de CBR das misturas solo-brita, conforme resultados apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Parâmetros dos materiais investigados (Parente *et al.*, 2003).

Material	P <sub>dmax</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>0</sub> (%)	CBR (%)	Expansão (%)
Solo Puro	1,940	11,0	17	0,7
50% Solo + 50% Brita	2,100	7,5	30	0,4
30% Solo + 70% Brita	2,150	7,0	35	0,5
50% Solo + 50% Escória	2,250	6,5	50	0,0
30% Solo + 70% Escória	2,325	6,0	70	0,0

A escória de aciaria, desde que seja submetida ao processo de cura por hidratação e seu potencial expansivo seja reduzido aos limites aceitáveis, poderá ser empregada como agregado para as camadas de base e sub-base de pavimentos. 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).

Barbosa (2013) caracterizou física, química e mecanicamente escórias de aciaria de diferentes siderurgias no Brasil (Tabela 2.6). De maneira geral, as escórias de aciaria caracterizadas apresentaram potencial de aplicação em pavimentação, com resultados expressivos e positivos para seu uso como base e sub-base. O alto resultado de expansão da escória de uma das quatro amostras (siderúrgica 4) indicou que ela precisa veementemente de um processo de cura e acompanhamento contínuo do processo de estabilização.

Tabela 2.6 – Caracterização da escória de aciaria (Barbosa, 2013).

Análises	Siderúrgica				
	1	2	3	4	5
I.S.C.(%)	227,9	106,4	108,8	135,8	125,3
Umidade Ótima (%)	9,0	5,6	5,7	6,0	8,5
Abrasão Los Angeles (%)	20,7	24,2	19,4	20,2	18,1
Expansão PTM-130	0,67	0,54	1,31	18,91	0,31

Tarazona (2016) avaliou mediante estudos laboratoriais a aplicabilidade do agregado siderúrgico misturado com solo tropical como elemento constituinte nas camadas de base de pavimentos rodoviários. Foram avaliadas, além do agregado siderúrgico, misturas nas proporções 90%:10% (M9010), 80%:20% (M8020) e 70:30% (M7030), sendo a primeira fração correspondente ao agregado siderúrgico e a segunda ao solo tropical. Os estudos verificaram a aplicabilidade dos materiais segundo ensaios de caracterização física (granulometria, limites de Atterberg, densidade real dos grãos, absorção) e mecânica (compactação, I.S.C, abrasão *Los Angeles* e potencial de expansão), tendo como referência os parâmetros estabelecidos na NBR 16364 (ABNT, 2015), a qual estabelece procedimento para execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária. Na Tabela 2.7 são apresentados alguns resultados obtidos no estudo.

Tabela 2.7 – Caracterização da escória de aciaria (Tarazona, 2016).

Análises	Material				
	Agregado siderúrgico	M9010	M8020	M7030	Solo tropical
Classificação ASSTHO	A-1-a	-	-	-	A-7
Plasticidade (%)	NP	NP	NP	NP	21
Densidade Real dos Grãos	3,623	3,380	3,314	3,271	2,751
Absorção (%)	1,93	-	-	-	-
I.S.C.(%)	155,0	254,87	185,7	213,0	32,5
Umidade Ótima (%)	8,75	9,87	11,49	14,70	25,3
Abrasão Los Angeles (%)	28,0	-	-	-	-
Expansão PTM-130	0,92	-	-	-	-

Tarazona (2016) concluiu que o agregado siderúrgico utilizado na pesquisa apresenta bom desempenho para ser utilizado em obras de pavimentação rodoviária, satisfazendo os requisitos da norma NBR 16364 (ABNT, 2015). Entretanto, devido à heterogeneidade do material, recomendou-se a realização de ensaios de controle no material a ser utilizado em obra antes de sua aplicação.

#### 2.2.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE

O principal limitador para utilização da escória de aciaria como constituinte de camadas de pavimento rodoviário é o elevado potencial de expansão do material. Esta característica expansiva está relacionada aos compostos presentes no material. Dentre as reações expansivas as hidratações do óxido de cálcio livre ou cal livre (CaO) e do óxido de magnésio ou periclásio (MgO) são as mais importantes e maiores responsáveis pela desintegração e enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações.

A forma livre CaO desenvolve a expansão no material e alcança teores de até 10% do total de CaO, expandindo durante a transformação em hidróxido de cálcio, causando desagregação do material e um aumento de volume de 99,4% em relação ao óxido de cálcio livre. Esta expansão é influenciada por fatores como o teor e o tipo de CaO, a porosidade e o tamanho dos grãos da escória de aciaria. Quanto maior a porosidade, mais superfície exposta e mais rápida ocorre a hidratação (Machado, 2000).

O MgO presente na escória de aciaria é gerado durante o processo de refino do aço, promovido pelo uso da dolomita ou pelo desgaste do revestimento refratário do forno em contato com a umidade. Ao ser hidratado o óxido de magnésio se transforma em hidróxido de magnésio ou brucita (Mg(OH)<sub>2</sub>), nesta transformação os cristais do hidróxido podem aumentar de volume em até 119,54% do volume inicial do MgO, gerando expansão devido às tensões criadas pela diferença de volume molar entre o óxido e o hidróxido (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 a formação 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).

A reação de expansão das escórias de aciaria também ocorre, em menor escala, devido a corrosão e a oxidação do ferro metálico residual e a mudança alotrópica do C<sub>2</sub>S. Segundo Machado (2000), o teor total de ferro na escória representa cerca de 15% a 20% da sua composição média. O alto teor de ferro metálico encontrado na escória de aciaria tem origem no sopro ou no vazamento do aço líquido e contribui para transformação volumétrica da escória através da diferença molar dos produtos de corrosão e oxidação. Esta variação volumétrica pode gerar uma expansão de 77% a 329%, relação à forma metálica (Fe<sup>0</sup>).

A mudança alotrópica do silicato dicálcico ou ortossilicato de cálcio ( $C_2S$  ou  $2CaO.SiO_2$ ) pode ocorrer durante o resfriamento ou mesmo à temperatura ambiente e também contribui para expansão da escória de aciaria LD. Esta expansão é de apenas 10,4% no volume, sendo, porém, uma alteração que contribui para o agravamento dos efeitos gerais da expansão causada pelo CaO e pelo MgO e que causa o fenômeno de esfarelamento ou desagregação (Raposo, 2005).

Na Tabela 2.8 são apresentadas as variações volumétricas em função das transformações nas principais espécies químicas na escória de aciaria.

Tabela 2.8 – Características das espécies químicas isoladas antes da hidratação (Machado, 2000).

Nº	Fórmula	Nome	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	M. Mol (g/mol)	Vol. Molar (cm <sup>3</sup> /mol)	Variação volumétrica (%) <sup>*</sup>
1	MgO	Periclásio	3,58	40,31	11,26	Em relação ao MgO
2	Mg(OH) <sub>2</sub>	Brucita	2,36	58,33	24,72	119,5
3	CaO	Cal	3,38	56,08	16,59	Em relação ao CaO
4	Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandita	2,24	74,09	33,08	99,4
5	CaCO <sub>3</sub>	Calcita	2,93	100,09	34,16	105,9
		Aragonita	2,71	100,09	36,93	122,6
6	CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	Dolomita	2,87	184,41	64,25	287,3
7	Fe <sup>0</sup>	Ferro (metálico)	7,86	55,85	7,11	Em relação ao Fe <sup>0</sup>
8	FeO	Wüstita	5,70	71,85	12,61	77,4
9	FeO <sub>3</sub>	Hematita	5,24	159,69	30,48	328,7
10	Fe(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido	3,40	89,86	26,43	271,7
11	FeO(OH)	Geotita	4,28	88,85	20,76	192,0

\*Valores calculados a partir do volume e da densidade absoluta das espécies químicas isoladas.

A Tabela 2.9 apresenta fatores e mecanismos que geram instabilidade volumétrica nas escórias de aciaria e influenciam diretamente na expansão verificada no material.

Tabela 2.9 – Parâmetros que influenciam na expansão das escórias de aciaria (Machado, 2000).

Espécies químicas	Parâmetros que influenciam na expansão	Mecanismo
CaO	Teor da espécie no estado livre	Hidratação
	Umidade e temperatura	
	Teor de CO <sub>2</sub>	
	Tamanho dos grãos de escória	
Fe <sup>0</sup>	Teor de Fe <sup>0</sup>	Oxidação
	Umidade	
	Tempo de exposição ao ar	
	Teor de oxigênio no resfriamento	
C <sub>2</sub> S	Tamanho dos grãos de escória	Transformação alotrópica
	Velocidade e temperatura de resfriamento	
	Impurezas iônicas	
	Basicidade das escórias	

Devido a característica expansiva das escórias de aciaria desenvolveram-se, por todo o mundo, diversos métodos para avaliar o potencial de expansão do material. Os métodos tradicionais utilizados na avaliação do potencial de expansão das escórias de aciaria são adaptados para atender aos requisitos de compacidade e estabilidade volumétrica em materiais de pavimentação, uma vez que, a sua principal utilização é a confecção de camadas de base e sub-base, constituintes de pavimentos rodoviários. (Tarazona, 2016).

Os métodos tradicionais para avaliação do potencial de expansão têm como base as normas ASTM D 698 (ASTM, 2000) e ASTM D 1883 (ASTM, 2005). Os ensaios utilizam corpos de prova cilíndricos e as medidas de expansão são lidas nos corpos de prova submersos em água e estimadas em função do aumento no seu comprimento vertical.

Na Tabela 2.10 são apresentadas as características dos principais métodos para avaliação do potencial de expansão das escórias de aciaria baseados na metodologia das normas ASTM D 698 (ASTM, 2000) e ASTM D 1883 (ASTM, 2005).

Tabela 2.10 – Características dos métodos para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria baseados na ASTM D 698 (ASTM, 2000) e ASTM D 1883 (ASTM, 2005) (Polese, 2007).

Métodos	Características
A 5015 (JIS, 1992)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corpos de prova: 3 cilíndricos com 15 cm de diâmetro, com utilização de granulometria normatizada;</li> <li>• Metodologia: submersão dos corpos de prova em água, com aplicação de ciclos de aquecimento diários de 6 horas;</li> <li>• Temperatura de imersão: <math>80 \pm 3</math> °C;</li> <li>• Período do ensaio: 10 dias;</li> <li>• Critério: expansão máxima de 2,0%;</li> <li>• Energia de Compactação utilizada: Proctor Modificado.</li> </ul>
D 4792 (ASTM, 2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corpos de prova: 3 cilíndricos com <math>152,4 \pm 0,7</math>mm de diâmetro e <math>116,4 \pm 0,5</math>mm de altura, com preparação da granulometria, conforme ASTM D 698/00;</li> <li>• Metodologia: submersão dos corpos de prova em água;</li> <li>• Temperatura de imersão: <math>70 \pm 3</math> °C;</li> <li>• Período do ensaio: 7 dias, caso não seja verificadas queda na taxa de expansão, mantém-se o ensaio para obter dados adicionais por mais 7 dias;</li> <li>• Critério: expansão máxima de 0,5%, conforme ASTM D 2940/03*;</li> <li>• Energia de Compactação utilizada: Proctor Normal.</li> </ul>
PTM 130 (PennDOT, 1978)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corpos de prova: 3 cilíndricos com <math>152,4 \pm 0,7</math>mm de diâmetro e <math>116,4 \pm 0,5</math>mm de altura, com preparação da granulometria, conforme ASTM D 698/00;</li> <li>• Metodologia: submersão dos corpos de prova em água por um período de 7 dias, posteriormente os corpos de prova são mantidos em estufa, por mais 7 dias, na condição saturada, mas não submersa **;</li> <li>• Temperatura de imersão: <math>71 \pm 3</math> °C;</li> <li>• Período do ensaio: 14 dias, sendo 7 dias na condição submersa e 7 dias na condição saturada;</li> <li>• Critério: expansão máxima de 0,5%, conforme PennDOT 408/2003***;</li> <li>• Energia de Compactação utilizada: Proctor Normal.</li> </ul>

\* ASTM D 2940/03 – *Standard specification for graded aggregate material for base or subbase for highways or airports.*

\*\* Durante a fase submersa deve ser adicionado 500 ml de água ao topo da amostra diariamente para manutenção da condição saturada da amostra.

\*\*\* PeenDOT, 2003 – *Publication 408/2003 – Highway Construction Specifications* do Departamento de Transportes da Pensilvânia.

No Brasil o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, através da norma para método de ensaio DMA-1 (DER-MG, 1982) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, por meio da norma ME-113 (DNIT, 2009) adaptaram a metodologia padronizada na PTM 130 (PennDOT, 1978).

Polese (2007) apresenta outros métodos para determinação experimental da expansão da escória de aciaria, tais como: ensaio utilizando a agulha de Le Chatelier – segundo o método ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 11.582 (ABNT, 1991) (Cimento Portland – Determinação da expansão de Le Chatelier), ensaio de autoclave – segundo método JIS – *Japanese Industrial Standards*, norma JIS R 2211 (JIS, 1991) (*Test method for hydration resistance of basic bricks*) ou segundo método ASTM - *American Society for Testing and Materials*, norma ASTM C151 (ASTM, 1993) (Estudo de expansão pro autoclave em cimento Portland), e ensaio de teste a vapor – segundo o método DIN – *Deutsches Institut für Normung* (Instituto alemão de normatização), padronizado pelo Comitê Europeu de Normatização (CEN), BS EN 17.441 (EN, 1998) (Testes para propriedades químicas de agregados).

### **2.2.5. MÉTODOS DE CONTROLE DA EXPANSIBILIDADE**

Como apresentado anteriormente a característica expansiva da escória de aciaria está relacionada aos compostos presentes no material e aos mecanismos de hidratações do óxido de cálcio livre ou cal livre (CaO) e de magnésio ou periclásio (MgO), corrosão e oxidação do ferro metálico (Fe<sup>0</sup>) residual e de mudança alotrópica do C<sub>2</sub>S. Neste sentido, os métodos de controle da expansão do material são baseados no combate ou atenuação destes mecanismos.

#### **2.2.5.1. Hidratação do CaO e MgO**

A expansão da escória de aciaria provocada pela hidratação da CaO e MgO tem como parâmetros influenciadores a umidade, temperatura, teor de CO<sub>2</sub> do ambiente e o tempo de estocagem do material. Estes parâmetros estão diretamente ligados ao tempo de estocagem ou tempo de envelhecimento do material em ambientes com umidade. O tempo de envelhecimento da escória de aciaria refere-se, principalmente ao tempo de exposição da escória na pilha de estocagem. Desta forma, o controle da expansão pode ser realizado pelo processo de hidratação

do material denominado cura, podendo ser realizado a céu aberto ou não, mantendo o material úmido. O tempo de estocagem vai depender do grau de exposição do material à umidade, à temperatura e do teor de CO<sub>2</sub> (Tarazona, 2016).

No Japão é necessário um período mínimo de 3 meses para que se possa avaliar a escória de aciaria quanto à expansão. Na Pensilvânia (EUA), esse período mínimo é de 6 meses, se a escória de aciaria for reprovada quanto a expansão, após esse período mínimo, é necessário um período adicional de cura de no mínimo 2 meses. Na França, as escórias de aciaria recém-produzidas destinadas a construção de estradas devem permanecer estocadas ao ar livre por um período mínimo de um ano, já com a granulometria final de utilização em bases e sub-bases rodoviárias (Raposo, 2005).

No processo de cura acelerada, após a solidificação e britagem, a escória de aciaria é submetida ao *spray* de água quente (cura por água quente), à injeção de vapor ou passagem através de zona de vapor (cura por vapor), permitindo acelerar a estabilização da escória e reduzindo o tempo de cura (Geyer, 2001).

Outro fator importante na estabilização da escória de aciaria reside no teor de CaO e MgO e as transformações ocorridas na hidratação do material. Gupta *et al.* (1994) verificaram variação da umidade e do CO<sub>2</sub> e a impossibilidade de que toda cal livre seja estabilizada na pilha durante o tempo de estocagem. Foi verificado que em uma pilha de estoque, a quantidade de cal livre pode aumentar com a profundidade da pilha, variando de 0,1 a 2,1% de 0 a 2 metros de profundidade da pilha (Machado, 2000). Na Figura 2.11 pode ser visto um pátio de estocagem de escória de aciaria.



Figura 2.11 – Pátio descoberto de estocagem de escória de aciaria (Raposo, 2005).

Segundo Geyer (2001) já se comprovou que o armazenamento ao ar, sem regar com água, não oferece garantias quanto ao controle da expansão da escória de aciaria, contudo as pilhas de estocagem devem possuir uma altura máxima entre 1,5 e 2,0 metros. Lima *et al.* (2000) sugerem

no máximo 10.000 toneladas de material por pilhas 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.

Tarazona (2016) apresenta, simplificada, alguns tipos de tratamento para controle da expansibilidade das escórias de aciaria, a descrição e o momento de atuação destes tratamentos, bem como vantagens, desvantagens e uma graduação da eficiência relativa (ER) do método de tratamento (Tabela 2.11).

Tabela 2.11 – Alguns tratamentos para controle da expansibilidade das escórias de aciaria (Tarazona, 2016).

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

\*NP – tratamentos que não tem indicada a eficiência do processo, sendo necessária a confirmação da efetividade dos tratamentos sugeridos.



Um processo alternativo que pode minimizar os efeitos da expansão é a mistura com outro material capaz de absorver esta expansão, como as argilas. Trata-se um processo unicamente físico, sem considerar nenhuma reação química na mistura. O material mais fino diminui a permeabilidade da escória de aciaria e o contato escória-água. Para o procedimento deve-se atentar na qualidade do material a ser utilizado na mistura, que em caso de argilas, deve ser laterítica e não possuir característica expansiva (Silva, 2001).

Silva (1994) realizou mistura de amostras de escória de aciaria da Companhia Siderúrgica Tubarão (CST), sem nenhuma cura, com argila para execução de camadas de base e sub-base. A maior expansão encontrada para as misturas utilizadas foi de 0,5%.

#### 2.2.5.2. Corrosão e oxidação do Fe<sup>0</sup>

Como os mecanismos de corrosão e oxidação estão ligados diretamente a umidade, ao tempo de exposição ao ar, o teor de oxigênio no resfriamento e ao tamanho dos grãos da escória, a principal forma de controle da expansão por estes mecanismos está na verificação e controle das condições de exposição da escória, envolvendo também o processo de cura do material.

#### 2.2.5.3. Mudança alotrópica 2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S

O mecanismo da mudança alotrópica sofrida na escória de aciaria é influenciado pela velocidade e temperatura de resfriamento e pela presença de outras espécies químicas nesse fenômeno. Segundo Machado (2000), o resfriamento lento das escórias de aciaria provoca as transformações alotrópicas  $\alpha \rightarrow \alpha' \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ , que apresenta expansão na solidificação. Desta forma, uma das maneiras de controlar a expansão devido a transformação alotrópica é o resfriamento brusco, não possibilitando a transformação completa do C<sub>2</sub>S, impedindo a nucleação dos cristais e dificultando a formação da fase  $\gamma$ , e mantendo a forma  $\beta$  estável. Na Tabela 2.12 são apresentadas as transformações de fase sofridas pelo silicato de cálcio em função da temperatura de resfriamento.

Tabela 2.12 – Transformações do silicato de cálcio (2CaO.SiO<sub>2</sub>) em função da temperatura de resfriamento (Machado, 2000).

	Fase Líquida	Densidade ( $\delta$ )	Aumento de volume (%)	Sistema cristalino	Temperatura (°C)	
					Transformação	Estabilização
Transformação	$\alpha$	3,07	0	Trigonal	2130	>1425
	$\alpha'$	3,31	-7,82	Ortorrômbico	1425	1425-1160
	$\beta$	3,28	0,91	Monoclínico	1160-680	680-500
	$\gamma$	2,97	10,44	Ortorrômbico	<500	<500

## 2.2.6. ASPECTOS AMBIENTAIS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

Quando se trata de resíduos além das verificações de comportamento geotécnico, através da caracterização física e mecânica, também deve-se considerar as características ambientais do material, com objetivo de evitar riscos ambientais e à saúde pública.

Apesar de existirem vários métodos para avaliar o potencial poluente dos resíduos, os ensaios de lixiviação são os mais utilizados. Na Europa o ensaio normalmente utilizado em laboratório, para a avaliação ambiental das escórias de aciaria processada é o ensaio de lixiviação de extração (ou método descontínuo), realizado segundo a norma do *European Committee for Standardization* (CEN) 12457-2 (EN, 2002), onde a relação líquido para sólido é igual a 10 l/kg e a dimensão máxima das partículas é inferior a 4mm, ou segundo a norma 12457-4 (EN, 2002), onde a relação líquido para sólido é também de 10 l/kg e a dimensão máxima das partículas é inferior a 10mm. A preparação dos eluatos efetua-se de acordo com a norma 1744-3 (EN, 2002). Existem, no entanto, outros ensaios de lixiviação, como por exemplo, o ensaio de coluna, que segundo alguns estudos simulam melhor o comportamento ambiental observado em campo (Ferreira, 2010).

Segundo Tarazona (2016), nos Estados Unidos, desde 1920, a Associação Nacional da Escória (NSA) apresentam relatórios técnicos que mostram as escórias de aciaria como não perigosas. Já em 1980, a *Environmental Protection Agency* (EPA) - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – propôs um regulamento para resíduos perigosos, baseado em estudos de investigação e ensaios feitos na escória de aciaria, classificando-as como resíduos não perigosos.

No Brasil, em 2004, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, com o objetivo de classificar os resíduos sólidos quanto a seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser geridos adequadamente, publicou a NBR 10.004 (ABNT, 2004) - Resíduos sólidos – Classificação. A referida norma classifica os resíduos como: Classe I (Perigosos) ou Classe II – (Não perigosos), sendo que os não perigosos são subdivididos em Classe II A (não inertes) e Classe II B (Inertes).

Para classificação dos resíduos utilizando a NBR 10.004 (ABNT, 2004), são utilizadas as normas NBR 10.005 (ABNT, 2004) – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e NBR 10.006 (ABNT, 2004) – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, que fixam requisitos exigíveis para obtenção, respectivamente, de extrato lixiviado e solubilizado de resíduos sólidos, visando os resíduos classificados pela

NBR 10.004 com classe I e classe II, além da NBR 10.007 (ABNT, 2004) – Amostragem de resíduos sólidos, a qual fixa requisitos exigíveis para amostragem de resíduos sólidos.

Tarazona (2016) apresenta relatos de resultados de classificação da escória de aciaria realizado em diversas pesquisas que utilizaram a metodologia prescrita na NBR 10.004 (Tabela 2.13) e indica que os resultados dos estudos para caracterização ambiental presentes na literatura, em geral, apontam para classificação da escória de aciaria como um material não perigoso, mas também não inerte, com a presença de alguns elementos químicos solubilizados, os quais podem ser utilizados sem representarem riscos para o meio ambiente ou a saúde pública.

Tabela 2.13 – Resultados de classificação das escórias de aciaria realizados em diversas pesquisas, utilizando metodologia prescrita na NBR 10.004 (Tarazona, 2016).

<b>Pesquisa</b>	<b>Descrição</b>	<b>Resultados</b>
(Mancio, 2001)	Ensaio de lixiviação em escória de aciaria.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nenhum elemento presente na composição química foi lixiviado;</li> <li>Observou que o teor de flúor (F) ultrapassou os limites estabelecidos pela NBR 10.004;</li> <li>Classificou o material como resíduo não perigoso, mas também não inerte.</li> </ul>
(Raposo, 2005)	Ensaio de lixiviação e solubilidade em amostras de escória de aciaria tipo LD	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observou que os elementos analisados (mercúrio, arsênio, cádmio, chumbo, cromo, selênio, prata, bário e fluoreto), no ensaio de lixiviação, apresentaram valores de concentração inferiores a estabelecido na NBR 10.004;</li> <li>Classificou o material como não perigoso.</li> </ul>
Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora – MG (FCT, 2005)	Relatório técnico com classificação ambiental de escória de aciaria para 7 agregados produzidos em siderúrgicas brasileiras.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Com os ensaios de lixiviação e solubilidade classificou seis das sete amostras como resíduos classe II A (não perigosos, não inertes) e uma das amostras na classe II B (não perigosa, inerte);</li> <li>Verificou que nenhum dos elementos químicos analisados para as 7 amostras, pelo ensaio de lixiviação, ultrapassou os limites estabelecidos em norma;</li> <li>Observou que no ensaio de solubilização, o alumínio em 6 das 7 amostras, e o Fluoreto em 1 das amostras, ultrapassaram os limites normatizados.</li> </ul>
(Barbosa, 2013)	Caracterização geoambiental das escórias de aciaria de cinco estados brasileiros.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os ensaios de lixiviação e solubilidade indicaram que os materiais geram baixo impacto no meio ambiente quando aplicadas;</li> <li>Concluiu que os elementos que excederam os limites disponíveis são em sua maioria encontrados em solos convencionais nos estados brasileiros avaliados;</li> <li>Classificou o material na Classe II A.</li> </ul>

## 2.3. NORMATIVA BRASILEIRA PARA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA EM CAMADAS DE PAVIMENTOS

No Brasil, o então Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER, atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, através do Instituto de Pesquisa Rodoviária – IPR, a fim de alcançar um de seus objetivos, qual seja, o de desenvolver estudos e pesquisas em novos materiais rodoviários, tem publicado desde 1990 normas especificando materiais, procedimentos e serviços para utilização de escória em pavimentos rodoviários.

Além de publicações do IPR, também pode-se citar normativos editados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, que estabelecem, direta ou indiretamente, procedimentos e especificações para o aproveitamento da escória de aciaria.

A seguir são elencadas as normas técnicas vigentes para utilização de escórias em pavimentos rodoviários, juntamente com suas principais especificações:

### 1. Especificações de Material: EM-260 (DNER, 1994), EM-262 (DNER, 1994)

Publicadas inicialmente em 1990, foram readequadas em 1994, mantendo-se inalterado o seu conteúdo técnico. Têm como objetivo fixar características gerais e específicas exigíveis para escória de alto-forno e aciaria, respectivamente, para emprego em camadas de pavimento rodoviário, assim como, definições e amostragem para aceitação ou rejeição do material. Na Tabela 2.14 são apresentadas características para o material exigidas em cada norma.

Tabela 2.14 – Características exigidas nas normas EM-260 (DNER, 1994) e EM-262 (DNER, 1994) para utilização de escórias de alto-forno e aciaria.

Características	Escória de alto-forno	Escória de aciaria
Composição granulométrica	Deve-se manter na proporção de 40% na faixa de até 1,27cm (1/2") e de 60% na faixa de 1,27cm a 5,08cm (2") de abertura nominal e devem atender a granulometria do projeto.	
Absorção de água (%)	1% a 3%	1% a 2%
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2 a 3 g/cm <sup>3</sup>	3 a 3,5 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	1,10 a 1,24 kg/dm <sup>3</sup>	1,5 a 1,7 kg/dm <sup>3</sup>
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	Máximo de 35%	Máximo de 25%
Durabilidade ao sulfato de sódio (em cinco ciclos) (%)	0,0% a 5,0%	0,0% a 5,0%
Expansão (Método PTM130)	-	Máximo de 3,0%
Observações	Devem ser resfriadas ao ar (não granuladas) e consistir de fragmentos angulares, razoavelmente uniformes quanto a massa específica e qualidade isentas de grãos lamelares, impurezas ou materiais indesejáveis.	Devem estar isentas de impurezas orgânicas, de contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais que possam prejudicar os valores especificados em projeto.

## II. Procedimento: PRO-263 (DNER, 1994)

Norma técnica com a finalidade de fixar condições para emprego de escória de aciaria em pavimentos rodoviários. Nesta, define-se que as escórias especificadas na Norma EM-262 (DNER, 1994) podem ser empregadas em construção de sub-base, base e em misturas betuminosas, em conformidade com as exigências constantes de projetos a que elas se destinarem.

A norma ratifica a necessidade de haver um rigoroso controle da escória de aciaria, quando da sua aceitação, relativa à expansão, não devendo ser superior a 3% ou valor determinado pela especificação particular de projeto, conforme Método PTM 130.

## III. Classificação: NBR 10.004 (ABNT, 2004) e Amostragem: NBR 10.007 (ABNT, 2004)

Norma técnica com objetivo de classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. Nesta os resíduos são classificados em:

- Classe I (Perigosos) → Resíduos que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem representar risco à saúde pública (provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices) ou riscos ao meio ambiente, quando gerenciado de forma inadequada, além dos que apresentam características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;

A norma apresenta ainda dois Anexos (A e B) com uma lista ampla de resíduos classificados como perigosos.

- Classe II (Não perigosos) → Resíduos que não foram classificados, conforme item anterior, como perigosos;
- Classe II A (Não inertes) → Aqueles resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I (perigosos) ou resíduos classe II B (Inertes). Estes resíduos podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- Classe II B (Inertes) → Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10.007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiental, conforme ABNT NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, executando-se aspectos, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da norma.

A norma NBR 10.007 (ABNT, 2004) fixa requisitos e procedimentos a serem adotados para amostragem de resíduos sólidos.

#### IV. Procedimento: NBR 10.005 (ABNT, 2004)

O documento fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10.004, como classe I (Perigosos) e classe II (Não perigosos). A lixiviação consiste no processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator.

Após realização dos procedimentos descritos em norma, obtém-se as seguintes informações: teor de sólidos secos (%), pH do extrato lixiviado obtido, tempo total de lixiviação e volume dos líquidos obtidos. Para efeito de classificação dos resíduos, deve-se comparar os dados obtidos com aqueles constantes no anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

#### V. Procedimento: NBR 10.006 (ABNT, 2004)

A norma fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10.004, como classe I (Perigosos) e classe II (Não perigosos).

Após realização dos procedimentos descritos em norma, obtém-se as seguintes informações: teor de umidade (%) e pH medido no extrato solubilizado. Para efeito de classificação dos resíduos, deve-se comparar os dados obtidos com aqueles constantes no anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

#### VI. Método de Ensaio: ME-113 (DNIT, 2009)

A norma técnica estabelece a sistemática a ser empregada nos ensaios em laboratório para a determinação do potencial de expansão para escória de aciaria. A metodologia adotada no ensaio é baseada no Método PTM 130 (*Method of Test for Evaluation of Potential Expansion of Steel Slags*), desenvolvido pelo *Pennsylvania Departamento of Transportation*.

#### VII. Especificações de Serviço: ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009)

As normas estabelecem a sistemática a ser empregada na execução e no controle de qualidade da execução da camada de sub-base e base, respectivamente, de pavimento com escória de aciaria LD, produzido na ARCELOMITTAL-TUBARÃO-ACERITA®, estabilizadas

granulometricamente na proporção máxima de 80% e mínima de 50%, em peso, misturada com solo de comportamento geotécnica laterítico, para utilização em rodovias com  $N < 5 \times 10^6$ .

A escória de aciaria LD com redução de expansão – ACERITA® para execução de sub-base e base deve apresentar composição granulométrica satisfazendo a faixa da Tabela 2.15;

Tabela 2.15 – Faixa granulométrica da escória de aciaria – ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (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

Na Tabela 2.16 são apresentadas demais características exigidas em cada especificação para utilização da escória de aciaria.

Tabela 2.16 – Características exigidas nas especificações ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009) para utilização de escória de aciaria.

Características	Sub-base	Base
I.S.C. (%) (Proctor Intermediário)	Igual ou superior a 60%	Superior ou igual a 80%
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	Inferior a 40%, admitindo-se valores maiores no caso de terem apresentado desempenho satisfatório.	
Expansão (DNIT 113/2009-ME) (%)	Média de três corpos-de-prova inferior a 3,0%	
Módulo de Resiliência (MPa)	Igual ou superior a 300 Mpa	

Os solos destinados a confecção de sub-base e base devem apresentar comportamento laterítico pertencendo a um dos grupos LA, LA' e LG' da classificação M.C.T., definido pelo método CLA-259 (DNER, 1996). Sendo aceitável que o solo tenha até 15%, em peso, retido na peneira nº 10 e sua composição granulométrica satisfaça a faixa da Tabela 2.17.

Tabela 2.17 – Faixa granulométrica do solo – ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009).

Peneiras	% 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

As misturas de escória de aciaria e solo, para execução de sub-base e base, devem apresentar composição granulométrica satisfazendo as faixas da Tabela 2.18:

Tabela 2.18 – Faixa granulométrica para mistura de escória de aciaria e solo – ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009).

Peneiras	% em peso passando		Tolerâncias de 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

Na Tabela 2.19 são apresentadas demais características exigidas em cada especificação para utilização de mistura de escória de aciaria e solo.

Tabela 2.19 – Características exigidas nas especificações ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009) para utilização de misturas de escórias de aciaria e solo.

Características	Sub-base	Base
I.S.C. (%) (Proctor Intermediário)	Superior a 20%	Superior a 60%
Expansão (DNIT 172/2016-ME) (%) (Proctor Intermediário)	Máxima de 1,0%.	Máxima de 0,5%.
Expansão (DNIT 113/2009-ME) (%)	Média de três corpos-de-prova inferior a 1,5%	
Módulo de Resiliência (MPa)	-	Igual ou superior a 300 MPa

#### VIII. Procedimento: NBR 16.364 (ABNT, 2015)

O procedimento estabelece as condições exigíveis para a execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária.

A norma especifica que o agregado siderúrgico deve apresentar as seguintes características:

- ✓ índice de Suporte Califórnia (I.S.C.) deve ser igual ou superior a 80 %, com energia de compactação do método C (proctor modificado);
- ✓ abrasão "Los Angeles" deve apresentar desgaste inferior a 55%, admitindo-se valores maiores no caso de ter apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior;
- ✓ média do potencial de expansão de três corpos de prova deve ser inferior a 3%;
- ✓ o módulo de resiliência na umidade ótima deve ser igual ou superior a 90 Mpa, para o menor valor de tensão confiante aplicada;
- ✓ o índice de forma deve ser superior a 0,5 e a porcentagem de partículas lamelares deve ser menor ou igual a 10%;
- ✓ distribuição granulométrica conforme a ABNT NBR 7181 e satisfazer a Tabela 2.20.

As misturas de composta por agregado siderúrgico e solo devem apresentar as seguintes características:



- ✓ com solos com características lateríticas, deve apresentar limite de liquidez menor ou igual a 40% e índice de plasticidade menor ou igual a 15%;
- ✓ com solos que não possuem características lateríticas, deve apresentar limite de liquidez menor ou igual a 25% e índice de plasticidade menor ou igual a 6%;
- ✓ índice de Suporte Califórnia (I.S.C.) deve ser igual ou superior a 20 %, com expansão inferior a 1%, para sub-bases e igual ou superior a 60% (para N inferior ou igual a  $5 \times 10^6$ ), com expansão inferior ou igual a 0,5%, e I.S.C. igual ou superior a 80% (para N superior a  $5 \times 10^6$ ), com expansão inferior ou igual a 0,5%;
- ✓ granulometria conforme a NBR 7181 (ABNT, 1984) e satisfazer a Tabela 2.22.

IX. Especificações de Serviço: ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017)

Nas normas define-se a sistemática a ser empregada na execução de camadas de base e sub-base, respectivamente, de pavimento utilizando açobrita, com redução de expansão, estabilizado granulometricamente, produzido por usinas siderúrgicas, para utilização em rodovias, estabelecendo os requisitos relativos ao material, equipamento, execução, condicionantes ambientais e controle de qualidade dos materiais empregados, além de critérios para aceitação ou rejeição e medição dos serviços. O açobrita deve apresentar composição granulométrica satisfazendo a faixa da Tabela 2.20;

Tabela 2.20 – Faixa granulométrica do agregado siderúrgico – ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

Peneiras	% em peso passando	Tolerâncias de faixa de projeto
2"	100	± 7
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

Na Tabela 2.21 são apresentadas demais características exigidas em cada especificação para utilização do açobrita.

Tabela 2.21 – Características exigidas nas especificações ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017) para utilização de açobrita.

Características	Sub-base	Base
I.S.C. (%)	Igual ou superior a 20% (Proctor Intermediário)	Igual ou superior a 80% (Proctor Modificado)
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	Inferior a 55%, admitindo-se valores maiores no caso de terem apresentado desempenho satisfatório	
Expansão (DNIT 113/2009-ME) (%)	Média de três corpos-de-prova inferior a 3,0%	
Módulo de Resiliência (MPa)	Igual ou superior a 300 Mpa.	
Índice de forma	Superior a 0,5 e percentual de partículas lamelares menor ou igual a 10%	

As misturas compostas por agregado siderúrgico e solo devem apresentar composição granulométrica satisfazendo uma das faixas da Tabela 2.22.

Tabela 2.22 – Faixa granulométrica das misturas (agregado siderúrgico+solo) – ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

Peneiras	PARA N > 5x10 <sup>6</sup>			PARA N < 5x10 <sup>6</sup>			Tolerâncias de faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	–	–	–	–	± 7
1"	–	75–90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30–65	40–75	55–85	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

Na Tabela 2.23 são apresentadas demais características exigidas em cada especificação para utilização de misturas de açobrita e solo.

Tabela 2.23 – Características exigidas nas especificações ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017) para utilização de misturas de açobrita e solo.

Características	Sub-base	Base	
		N ≤ 5 x 10 <sup>6</sup>	N > 5 x 10 <sup>6</sup>
I.S.C. (%)	Igual ou superior a 20% (Proctor Intermediário)	Superior a 60% (Proctor Modificado)	Superior a 80% (Proctor Modificado)
Expansão (DNIT 172/2016-ME) (%)	Inferior ou igual a 1% (Proctor Intermediário)	Inferior ou igual a 0,5% (Proctor Modificado)	Inferior ou igual a 0,5% (Proctor Modificado)
Expansão (DNIT 113/2009-ME) (%)	Média de três corpos-de-prova ≤ 1,5%	Média de três corpos-de-prova ≤ 1,5%	Média de três corpos-de-prova ≤ 1,0%
Limite de Liquidez (%)	-	Menor ou igual a 40%, para misturas com solos com características lateríticas, e 25% para solos não lateríticos	
Índice de Plasticidade (%)	-	Menor ou igual a 15%, para misturas com solos com características lateríticas, e 6% para solos não lateríticos	

### **3. MÉTODOS E PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **3.1. MATERIAIS DA PESQUISA**

Neste capítulo, apresentam-se as características gerais dos materiais utilizados na pesquisa, suas origens e processos de amostragem, bem como a metodologia empregada para realização dos ensaios de caracterização.

Os ensaios de caracterização das amostras foram realizados conforme metodologias definidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e normas técnicas internacionais.

Estes ensaios ocorreram nos Laboratórios de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da UnB - Universidade de Brasília, na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP e no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GeoPav), pertencente ao Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da UFS – Universidade Federal de Sergipe.

##### **3.1.1. AÇOBRITA**

As amostras de açobrita caracterizadas no presente estudo foram fornecidas pelo IABR e foram geradas a partir de escória de aciaria produzida em conversor a oxigênio tipo LD de usina siderúrgica integrante do IABR (Figura 3.1). Na usina foram realizados todos os procedimentos prévios referente a granulometria e ao controle de expansão do material, por meio de cura, através da estocagem a céu aberto. Após este procedimento, uma amostra de aproximadamente 3 toneladas foi transportada ao Laboratório de Geotecnia da UnB, onde foram realizados os ensaios iniciais da pesquisa. Posteriormente, uma amostra de aproximadamente 250 kg do açobrita foi enviada ao Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFS para finalização dos ensaios.

Na Tabela 3.1 estão listados os ensaios utilizados para caracterização e classificação do açobrita e determinação de suas propriedades bem como as normas técnicas adotadas, visando a utilização em pavimentação.

Tabela 3.1 – Ensaios realizados no açobrita e normas adotadas.

<b>ENSAIO</b>	<b>NORMAS</b>
Limites de Atterberg ou de Consistência	ME 082 (DNER, 1994) e ME 122(DNER, 1994)
Análise Granulométrica	ME 080 (DNER, 1994) e ME 051 (DNER, 1994)
Densidade Real dos Grãos	D5550 (ASTM, 2014) e ME 093 (DNER, 1994)
Absorção de Água	NBR NM 53 (ABNT, 2014)
Compactação	ME 164 (DNIT, 2013)
Índice de Suporte Califórnia	ME 172 (DNIT, 2016)
Abrasão “Los Angeles”	ME 035 (DNER, 1998)
Expansão PTM130	ME 113 (DNIT, 2009)

### 3.1.2. SOLO

O solo tropical utilizado na pesquisa (Figura 3.1) foi fornecido pelo DNIT e coletado em 26 de outubro de 2016, na região onde a princípio, seriam executadas camadas de base de um trecho experimental, no lote 07 da duplicação da BR 381/MG, especificamente no lado direito da estaca 773. Aproximadamente 500 kg do material preliminarmente identificado como solo fino argiloso vermelho foi transportado até o Laboratório de Geotecnia da UnB em sacos plásticos. Posteriormente, uma amostra de aproximadamente 250 kg do solo foi transportada para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFS, onde foram finalizados os ensaios de caracterização. Outra parte do material foi enviada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP para realização dos ensaios de classificação pela metodologia MCT.



Figura 3.1 – Amostras de solo e açobrita.

Na Tabela 3.2 apresenta-se uma lista com os ensaios realizados para caracterização e classificação do solo e determinação de suas propriedades e as normas técnicas adotadas para realização dos ensaios, visando a utilização em pavimentação.

Tabela 3.2 – Ensaios realizados no solo e normas adotadas.

<b>ENSAIO</b>	<b>NORMAS</b>
Limites de Atterberg ou de Consistência	ME 082 (DNER, 1994) e ME 122 (DNER, 1994)
Análise Granulométrica	ME 051 (DNER, 1994)
Densidade Real dos Grãos	ME 093 (DNER, 1994)
Compactação	ME 164 (DNIT, 2013)
Índice de Suporte Califórnia	ME 172 (DNIT, 2016)
Classificação Metodologia MCT	CLA 259 (DNIT, 1996), ME 258 (DNER, 1994) e ME 256 (DNER, 1994)

### 3.1.3. MISTURAS

Para a execução da base do trecho experimental na BR 381/MG, o DNIT definiu a utilização de uma mistura com 80% de açobrita e 20% de solo; nesse sentido, Tarazona (2016) estudou o comportamento de misturas de açobrita:solo com proporções de 70%:30%, 80%:20% e 90:10%, respectivamente. Tendo em vista que nas obras rodoviárias grande parte dos custos de execução estão associados ao transporte do material empregado, devido ao grande volume e às distâncias entre a origem e o local de aplicação dos materiais, buscou-se nesta pesquisa avaliar a possibilidade de utilização de proporções menores de açobrita em misturas com solos tropicais, procurando, desta forma, ampliar o potencial econômico de utilização do açobrita em locais mais afastados da fonte geradora, além de acrescentar novos dados à linha de pesquisa em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB.

Com esta finalidade, para análise do comportamento das misturas de açobrita e solo tropical, simulando as condições de campo especificadas e a influência das proporções de material nas características da mistura, as amostras foram preparadas e identificadas da seguinte forma:

- M4060: Mistura composta por 40% de açobrita e 60% de solo tropical;
- M5050: Mistura composta por 50% de açobrita e 50% de solo tropical;
- M6040: Mistura composta por 60% de açobrita e 40% de solo tropical.

Na Tabela 3.3 estão listados os ensaios realizados para caracterização e classificação das misturas e determinação de suas propriedades, visando a utilização em pavimentação, bem como as normas técnicas adotadas para realização dos ensaios.

Tabela 3.3 – Ensaio realizados nas misturas e normas adotadas.

<b>ENSAIO</b>	<b>NORMAS</b>
Límites de Atterberg ou de Consistência	ME 082 (DNER, 1994) e ME 122(DNER, 1994)
Análise Granulométrica	ME 080 (DNER, 1994) e ME 051 (DNER, 1994)
Densidade Real dos Grãos	D5550 (ASTM, 2014) e ME 093 (DNER, 1994)
Compactação	ME 164 (DNIT, 2013)
Índice de Suporte Califórnia	ME 172 (DNIT, 2016)
Expansão PTM130	ME 113 (DNIT, 2009)

## 3.2. MÉTODOS

### 3.2.1. AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para iniciar a parte experimental da pesquisa, preliminarmente, foi estimada a quantidade de material necessária para realização de todos os ensaios propostos para o açobrita, solo e misturas. Para a preparação dos ensaios de caracterização, tanto as amostras de açobrita quanto as amostras de solo foram secas ao ar na área externa do laboratório, posteriormente foi realizado o destorroamento com o auxílio de almofariz com mão de gral, a fim de reduzir o tamanho natural das partículas individuais dos materiais. Em seguida, para garantir uma melhor homogeneização das amostras, todo o material foi repartido com o auxílio de repartidor de 1” e 2”.

Após essa homogeneização dos materiais, foram preparadas as misturas de açobrita e solo (M4060, M5050, M6040) a partir das respectivas massas em peso. Desta forma, por exemplo, para preparação da quantidade de 90kg estimado para mistura M5050, foram misturados 45 kg de açobrita e 45 kg de solo tropical. Assim, com o propósito de garantir uma homogeneidade nas amostras ensaiadas, toda a mistura após preparada foi passada diversas vezes pelos repartidores de 1” e 2” e posteriormente ensacadas em quantidades menores.

Na preparação das amostras para os ensaios de caracterização (teor de umidade, análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, densidade real e absorção de água dos grãos retidos na peneira 4,8mm) utilizou-se a norma ME-041 (DNER, 1994).

Para preparação das amostras dos ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia e avaliação do potencial de expansão, os materiais foram ainda passados na peneira de 19 mm, e quando verificado material retido nesta, procedeu-se a substituição do mesmo por igual quantidade, em massa, de material passante na peneira de 19 mm e retido na peneira de 4,8mm,

consoante com o preconizado nas normas ME-164 (DNIT, 2013), ME-172 (DNIT, 2016) e ME-113 (DNIT, 2009), respectivamente.

### **3.2.2. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA**

Na determinação dos limites de consistência foram utilizados os métodos ME-122 (DNIT, 1994), para determinação do Limite de Liquidez (LL) e o ME-082 (DNIT, 1994), para determinação do Limite de Plasticidade (LP). Na determinação dos limites foram utilizados os materiais e aparelhos descritos nas referidas normas (Figura 3.2). Foram ensaiadas frações dos materiais e das misturas passante na peneira com abertura de 0,42mm (nº 40) e a partir dos resultados do LL e LP determinou-se os Índices de Plasticidade (IP) das amostras e das misturas, quando possível.



Figura 3.2 – Materiais e aparelhos utilizados nos ensaios dos limites de Atterberg.

### **3.2.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Para o açobrita e para as misturas foram realizados ensaios por peneiramento, conforme metodologia descrita na norma ME-080 (DNER, 1994), e sedimentação, conforme metodologia da norma ME-051 (DNER, 1994) com utilização de defloculante. Para o solo, foram realizadas análises granulométricas, incluindo a sedimentação (Figura 3.3) com e sem utilização de defloculante.



Figura 3.3 – Ensaio de granulometria por sedimentação.

A partir dos resultados obtidos, buscou-se estabelecer uma classificação para o açobrita de acordo com os métodos do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e *Transportation Research Board* (TRB), também denominado de Sistema AASHTO. O SUCS é um sistema de classificação aplicado a obras de engenharia de forma geral, já o AASHTO é específico para obras rodoviárias e de pavimentação. O solo foi classificado de acordo com o sistema SUCS, enquanto as misturas foram classificadas conforme o sistema AASHTO.

Com os resultados das análises granulométricas verificou-se a possibilidade do enquadramento do açobrita e das misturas nas faixas granulométricas para utilização em camadas constituintes de pavimentos rodoviários.

#### **3.2.4. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (Gs)**

No GeoPav (UFS), foram realizados os ensaios para determinação da densidade real do açobrita, solos e misturas, nas amostras secas ao ar, passantes na peneira de abertura 2,00 mm (nº 10), conforme preconizado a norma ME-093 (DNER, 1994). Na determinação das densidades, foram utilizados os materiais e aparelhos descritos na referida norma (Figuras 3.4a e 3.4b).

No Laboratório de Geotecnia (Unb), foram realizados ensaios para determinação de densidade real do açobrita e das misturas utilizando o equipamento Pentapicnômetro (Figura 3.5), modelo *Pentapyc™ 5200e*, da fabricante Quantachrome Instruments, conforme procedimentos da



norma D5550 (ASTM, 2014): *Standard Test Method for Specific Gravity of Solids by Gas Pycnometer*.

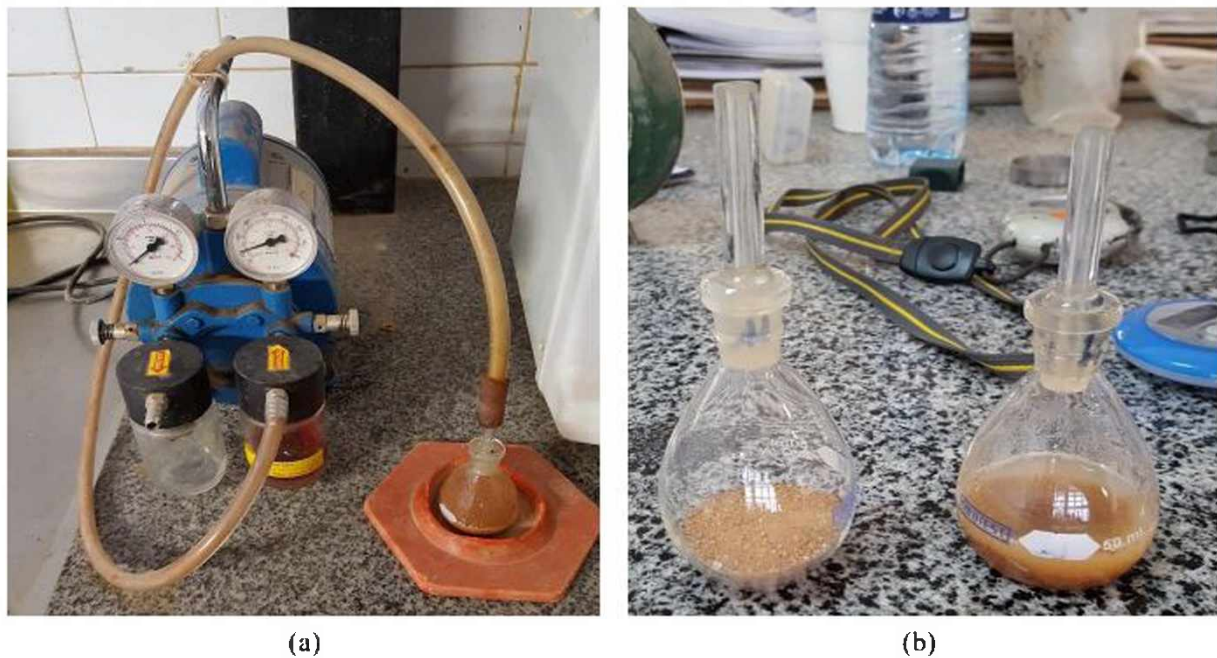


Figura 3.4 – (a) Aparelhos e (b) materiais utilizados nos ensaios de determinação da densidade real dos grãos.



Figura 3.5 – Pentapicnômetro (*Pentapyc™ 5200e*) e sistema de aquisição de dados.

Este equipamento utiliza gás para determinação da densidade real e do volume de diferentes materiais, podendo ser carregado com até cinco amostras acondicionadas, em cápsulas, que segundo o tamanho nominal da amostra podem ser grandes, médias ou pequenas. Assim, as amostras são analisadas automaticamente pelo equipamento sem interferência do operador durante a análise. O resultado é um valor médio de densidade das diferentes combinações de leitura realizadas pelo equipamento.

Visando verificar a variabilidade desta propriedade de acordo com o tamanho dos grãos, foram realizados ensaios em 3 amostras do açobrita e 1 amostra de cada mistura, determinando-se a propriedade nas frações retidas nas peneiras com abertura de 9,5mm, 4,8mm (nº 4), 2,0mm (nº10), 1,2mm (nº16), 0,6mm (nº 30), 0,42mm (nº 40), 0,25mm (nº 60), 0,15mm (nº 100) e 0,074mm (nº 200).

### **3.2.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA**

Para determinação da absorção de água do açobrita, foram realizados 3 ensaios no material retido na peneira de 4,8mm de abertura (Figura 3.6), conforme metodologia NBR NM- 53 (ABNT, 2009). A absorção, expressa em porcentagem, é definida pelo aumento de massa de agregado em relação a sua massa seca, resultado do preenchimento por água de seus vazios permeáveis.



Figura 3.6 – Ensaio de determinação da absorção de água do açobrita.

### **3.2.6. CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS–METODOLOGIA MCT**

Para classificação do solo tropical utilizado na pesquisa com base na metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), foi utilizado procedimento descrito na norma CLA 259/96 (DNER, 1996) e M-196 (DER/SP, 1989), que se fundamentam na determinação de propriedades de corpos-de-prova compactados, de dimensões miniatura (50 mm de diâmetro).

A amostra seca ao ar até atingir a umidade próxima da higroscópica, foi passada na peneira de abertura de 2,00 mm (Figura 3.7). Posteriormente a amostra foi repartida em 6 porções de 500g cada, e adicionado água para obtenção de amostras com umidades sucessivamente crescentes, seguido da homogeneização e acondicionados em sacos hermeticamente vedados (Figura 3.8)

permanecendo em repouso em câmara úmida, por um período de 24 horas para realização dos ensaios de compactação Mini MCV e perda de massa por imersão.



Figura 3.7 – Preparação da amostra de solo tropical para classificação na metodologia MCT.



Figura 3.8 – Amostra de solo tropical para ensaio de compactação em equipamento miniatura – mini MCV e perda de massa por imersão.

Após a preparação das amostras iniciou-se os procedimentos para compactação em equipamento miniatura, utilizando-se os equipamentos para execução do ensaio Mini-MCV (Figura 3.9), conforme metodologia descrita na norma ME-258 (DNER, 1994). Em seguida procedeu-se a determinação de perda de massa por imersão de acordo com a norma ME-256 (DNER, 1994).

Como resultado do ensaio Mini-MCV obtiveram-se as curvas de Mini-MCV (Nº de golpes x Altura do corpo de prova), a família de curvas de compactação (Umidade x Massa específica aparente seca), a partir dos quais foram obtidos, respectivamente, os coeficientes  $c'$  e  $d'$ .

Do ensaio de perda de massa por imersão obteve-se o coeficiente  $P_i$  (%) para cada teor de umidade ensaiado no Mini-MCV. A partir dos valores determinados para  $P_i$  e  $d'$ , calculou-se o coeficiente  $e'$ .

Com os valores de  $e'$  e  $e'$  obtidos, localizou-se no gráfico de Classificação MCT, o ponto que os representa, classificando a amostra de acordo com a área específica em que esse ponto se situa. Os resultados obtidos e sua análise estão demonstrados no capítulo 4.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.9 – Equipamentos para ensaio de compactação miniatura – mini MCV disponíveis na USP.

### 3.2.7. RESISTÊNCIA À ABRASÃO “LOS ANGELES”

O valor da abrasão “Los Angeles” do açobrita foi determinada conforme procedimento descrito na norma ME-035 (DNER, 1998). De acordo com a granulometria obtida nos ensaios de análise granulométrica, foi selecionada a graduação “A” especificada na mencionada norma para realização dos ensaios. Desta forma, a amostra total de 5.000 g seca em estufa, foi pesada em quatro frações de diferentes granulometrias de 1,25kg cada, obtendo assim a massa da amostra seca ( $m_n$ ). Depois de preparada, a amostra foi colocada dentro do tambor da máquina “Los Angeles” (Figura 3.10), juntamente com a carga abrasiva, composta de 12 esferas de aço, com aproximadamente 47,6mm de diâmetro e massa entre 390 e 445 g cada uma. Em seguida, fez-se girar o tambor, com o conteúdo, a uma velocidade de 30rpm até completar 500 rotações, conforme preconizado na mencionada norma.



Figura 3.10 – Máquina “Los Angeles”.

Logo após o material foi retirado do tambor, separado das esferas e passado na peneira de abertura 1,7mm, descartou-se o passante. O material retido foi lavado na própria peneira, reunido e seco na estufa, por 3 horas. Após esfriar determinou-se a massa da amostra lavada e seca ( $m'_n$ ).

O desgaste sofrido pelo material denominado abrasão “Los Angeles” ( $A_n$ ) foi calculado pela fórmula seguinte:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \quad (3.1)$$

O desgaste do material calculado e a análise do resultado estão apresentados no capítulo 4.

### 3.2.8. COMPACTAÇÃO

Para determinar a correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do açobrita, solo e misturas foram executados ensaios de compactação conforme metodologia descrita na norma ME-164 (DNIT, 2013).

Amostras não trabalhadas de aproximadamente 6,00 kg (açobrita e misturas) e 5,00 kg (solo) foram preparadas para determinação de cada ponto da curva de compactação, conforme descrito no item 3.2.1, sem reuso e com secagem prévia do material até a umidade higroscópica.

Foram feitos os cálculos da quantidade de água a adicionar. Procedeu-se então, ao acréscimo de água ao material e à mistura (Figura 3.11) e em seguida colocação na câmara úmida, por no mínimo 24 horas, para garantir uma melhor hidratação e homogeneização do material antes da realização da compactação.



Figura 3.11 – Preparação do material para ensaios de compactação e ISC.

Para determinação da curva de compactação, os corpos de prova foram moldados na energia do Proctor Modificado, tendo em vista que o objetivo da presente pesquisa foi verificar a possibilidade de utilização do açobrita e das misturas deste com solo tropical em camadas de base de pavimentos rodoviários e que para tal fim exige-se a verificação da Índice de Suporte Califórnia na energia de compactação de acordo como Método C – Modificada.

A compactação do material foi feita utilizando o cilindro grande, em cinco camadas iguais, aplicando-se 55 golpes por camada, com utilização do Soquete CBR/Proctor Automático, de fabricação da Solotest (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Soquete CBR/Proctor automática (Solotest).

Para traçar a curva de compactação de cada material foram obtidos ao menos 5 pares de valores de teor de umidade x massa específica aparente seca. Após o termino da compactação os corpos moldados (conjunto cilindro + material úmido compactado) foram utilizados nos ensaios de expansão e penetração, para determinação do Índice de Suporte Califórnia.

### 3.2.9. ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

Na determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ration* (CBR) do açobrita, solo e misturas foi utilizada a metodologia prescrita na norma ME-172 (DNIT, 2016). Foram determinados os ISC de todos os pontos das curvas de compactação dos materiais, obtendo-se as curvas ISC x Umidade.

Terminadas as moldagens necessárias para confecção da curva de compactação, as amostras foram preparadas com a colocação de pratos-base perfurados, sobrecargas e extensômetro fixo ao tripé porta-extensômetro para dar início à fase de verificação da expansão do material. Após a preparação dos corpos de prova, procedeu-se a imersão (Figura 3.13) destes a fim de medir a expansão ocorrida. Foram realizadas leituras do extensômetro de 24 em 24 horas, por um período de 96 horas (quatro dias).



Figura 3.13 – Corpos de prova imersos para verificação da expansão.

Terminado o período de imersão, escoou-se a água dos corpos de prova por 15 minutos, sendo 7,5 minutos em uma posição e os demais 7,5 minutos na posição inversa, com um giro de 180°, a fim de proporcionar um escoamento mais uniforme por todo corpo de prova. Findado este tempo iniciou-se a fase de penetração dos ensaios. Para penetração foi utilizada a prensa CBR/ISC manual, com capacidade de carga de 5.000 kgf (Figura 3.14), de fabricante Solotest.

A partir dos valores de penetração lidos no extensômetro traçou-se as curvas pressão x penetração e com os valores calculou-se o ISC para cada ponto. Com o ISC de cada ponto confeccionou-se o gráfico combinado com as curvas de compactação x umidade e curvas de ISC x umidade, a partir dos quais foi possível a obtenção do ISC de cada material. O ISC do material corresponde ao valor na curva de ISC associado à umidade ótima obtida na curva de compactação.



Figura 3.14 – Prensa CBR/ISC manual 5.000kgf (Solotest).



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

Dadas as características especiais do material, para avaliar o potencial de expansão do açosbrita e das misturas foi utilizado o procedimento descrito na ME-113 (DNIT, 2009), que é adaptado do método PTM 130 (*Method of Test for Evaluation of Potencial Expansion of Steel Slags*), desenvolvido pelo *Pennsylvania Departamento of Transportation*. A preparação das amostras seguiu os mesmos critérios estabelecidos nas normas ME-164 (DNIT, 2013) e ME-172 (DNIT, 2016) e os aparelhos utilizados para compactação e moldagem dos corpos de prova são basicamente os mesmos recomendados para realização dos ensaios de Compactação e determinação do Índice de Suporte Califórnia.

Previamente, para verificar a viabilidade de execução dos ensaios, procedeu-se a calibração da estufa marca Biopar, Modelo S336SD (2400W), com controle de temperatura digital microprocessado, disponível nos Laboratório da UFS, através leitura diária da temperatura durante 7 dias. Aferiu-se ainda as dimensões do equipamento para verificar a capacidade de armazenamento dos corpos de prova (Figura. 3.15), garantindo que o equipamento possuía as condições requeridas em norma para avaliação do potencial de expansão do material.

De posse da curva de compactação obtida conforme especificado na norma ME-164 (DNIT, 2013), determinaram-se as umidades ótimas e densidades máximas dos materiais ensaiados. A partir dos valores determinados realizou-se a moldagem de três corpos de prova, sendo um no ramo seco, um na umidade ótima ou próximo e o terceiro no ramo úmido. Para moldagem dos corpos de prova foi empregado o Soquete CBR/Proctor Automático (Figura 3.12), compactando-se o material em três camadas de espessura aproximadamente iguais com 56 golpes por camada.

Após a moldagem foi colocado papel filtro, invertido o molde com o material compactado, fixando-o na placa de base perfurada, com as hastes ajustada, aplicou-se a sobrecarga de 10 lb. (4,542 kg), para em seguida submergir o molde e os pesos em água pré-aquecida a 100 °F (38°C) (Figuras 3.16a e 3.16b), permitindo livre acesso da água por cima e por baixo da amostra.

Nos tanques contendo a água pré-aquecida, submergiu-se as amostras, para em seguida colocação na estufa numa posição nivelada à temperatura de  $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.17). Após, ajustou-se os tripés colocando o dial dos extensômetros na leitura zero. Para permitir a expansão térmica dos aparelhos de teste, a leitura da medida inicial, foi tomada apenas 30 minutos após a colocação da amostra na estufa à temperatura de  $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$ .



Figura 3.15 – Calibração da estufa utilizada no ensaio de potência de expansão.



(a)



(b)

Figura 3.16 – Pré-aquecimento da água para submersão dos moldes.

Dando sequência ao ensaio, foram anotadas as medidas diariamente por um período de 7 dias, adicionando-se água suficiente para que a amostra permanecesse completamente submersa, duas horas antes de cada leitura. Terminada a fase submersa do ensaio, após os 7 dias, a água foi parcialmente removida, com o auxílio de uma mangueira, utilizando o princípio de funcionamento do sifão com a diferença de pressão. Iniciou-se assim, a fase saturada (não

submersa) do ensaio, onde a amostra foi mantida na estufa por um período de 7 dias nas mesmas condições de temperatura da fase submersa.



Figura 3.17 – Amostras preparadas na estufa para ensaios de potencial de expansão.

A partir das leituras realizadas, foi calculado percentual de expansão volumétrica, dividindo-se a diferença entre as leituras do extensômetro após os 14 dias ( $L_f$ ) e a leitura inicial ( $L_i$ ), pela altura inicial da amostra (116,4mm).

$$\% \text{ Exp.} = \frac{(L_f - L_i)}{116,4} \times 100 \quad (3.2)$$



Figura 3.18 – Moldes com amostras após os 14 dias de expansão.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental do estudo da aplicabilidade de misturas de açobrita com um solo tropicais típico de Minas Gerais em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. A apresentação dos resultados está dividida de acordo com cada ensaio, onde estão apresentados inicialmente os resultados obtidos para o açobrita, seguidos pelos resultados do solo e por último das respectivas misturas.

### 4.2. LIMITES DE ATTERBERG OU LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Em linhas gerais, a consistência corresponde ao comportamento do material constituinte em função da variação da umidade, sendo de fundamental importância para caracterização dos solos utilizados nas mais diversas áreas da engenharia. Para determinação dos limites de consistência foram realizados 2(dois) ensaios para cada amostra.

#### 4.2.1. AÇOBRITA

Definiu-se as amostras de açobrita como não plástica (NP), constituindo-se, desta forma, em um material com características desejadas para emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários do ponto de vista de consistência.

O material passante na malha 0,42mm foi obtido no processo de britagem do açobrita, possuindo desta maneira, as mesmas características da fração mais grossa em relação à consistência, não apresentando sensibilidade a água.

#### 4.2.2. SOLO

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios para determinação do Limite de Liquidez ( $w_L$ ), utilizando o aparelho de Casagrande, conforme Método ME 122 (DNER,1994).

Tabela 4.1 – Resultados do limite de liquidez do solo.

SP_01	Umidade média (%)	33,12	33,70	34,12	34,37	34,84
	Número de golpes	34	28	24	19	15
SP_02	Umidade média (%)	35,40	35,56	35,99	36,79	37,60
	Número de golpes	33	28	25	20	16

Com os resultados apresentados na Tabela 4.1 foram traçados os gráficos das Figuras 4.1 e 4.2, dos quais foi extraído o teor de umidade corresponde ao limite de liquidez das amostras. Determinaram-se os valores de  $w_L$  igual a 34% para amostra SP\_01 e 36% para amostra SP\_02.

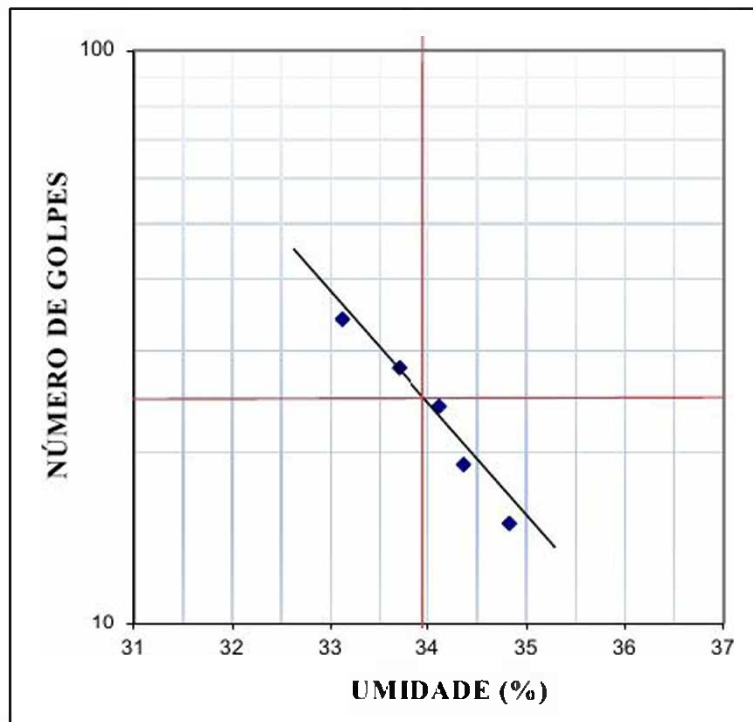


Figura 4.1 – Gráfico limite de liquidez do solo tropical - ensaio 01.

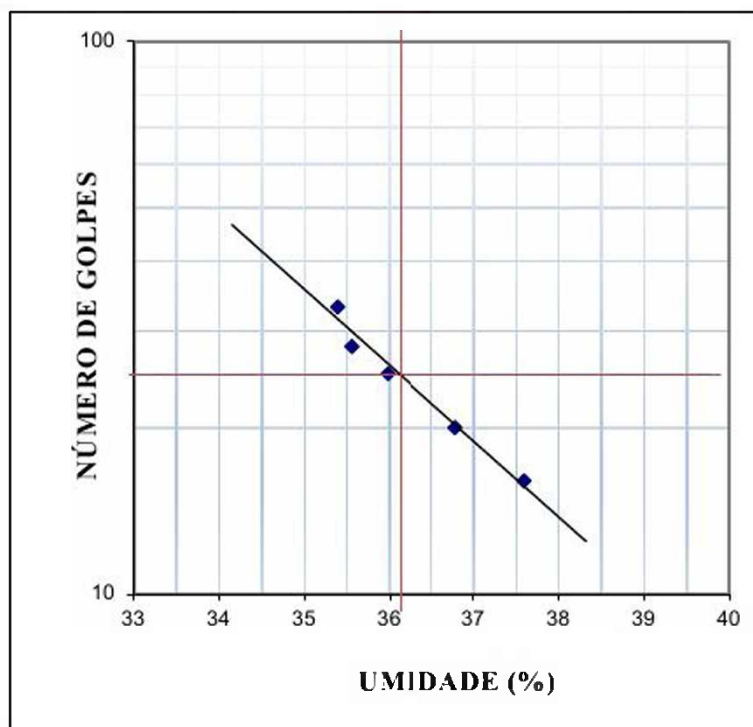


Figura 4.2 – Gráfico limite de liquidez do solo tropical - ensaio 02.

A Tabela 4.2 apresenta os dados obtidos nos ensaios para determinação de Limite de Plasticidade ( $w_p$ ). Determinaram-se valores de  $w_p$  igual a 27% para amostra SP\_01 e igual a 28% para amostra SP\_02.

Tabela 4.2 – Resultados do limite de plasticidade do solo.

Amostras	Umidade (%)					Tolerância $\pm$ 5%		Média	$w_p$
SP_01	26,15	27,48	27,70	27,73	27,29	25,91	28,63	27,27	27
SP_02	27,64	27,93	27,99	27,86	27,96	26,48	29,27	27,88	28

A partir dos valores de  $w_L$  e  $w_p$  obtidos foi calculado o Índice de Plasticidade (IP) de cada amostra. Obteve-se uma IP igual a 7 para amostra SP\_01 e igual a 8 para amostra SP\_02, caracterizando o solo como um material de pouca a média plasticidade.

Os solos, misturas de solos ou misturas de solos e materiais britados destinados a execução de camadas de base e sub-base, respectivamente, de pavimentos rodoviários devem atender aos parâmetros preconizados nas normas ES-141 (DNIT, 2010) – Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente e ES-139 (DNIT, 2010) – Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente. Neste sentido, a ES-139 (DNIT, 2010) não determina parâmetros de índice de consistência e a ES-141 (DNIT, 2010) estabelece limites de 25% ( $w_L$ ) e 6% (IP) para os materiais. Logo, o solo puro ensaiado não possui condições adequadas para utilização como constituinte de camadas de base para pavimentos rodoviários.

#### 4.2.3. MISTURAS M4060, M5050 E M6040

Definiu-se todas as amostras como não plástica (NP), constituindo-se dessa forma, em misturas com características desejadas para emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, conforme parâmetros estabelecidos nas Normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017). Os resultados demonstraram a grande prevalência da característica da não plasticidade do açobrita nas misturas ensaiadas, mesmo na Mistura M4060 que possui a menor proporção de açobrita das misturas estudadas, com apenas 40% de açobrita na sua constituição.

### 4.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Foram realizados 4 (quatro) análises granulométricas nas amostras, sendo 2 (duas) apenas por peneiramento e 2 (duas) completas (peneiramento e sedimentação), para o açobrita e misturas e 2 (duas) com defloculante e 2 (duas) sem defloculante, para o solo puro, ambas completas (peneiramento e sedimentação).

### 4.3.1. AÇOBRIITA

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 são apresentados os resultados das análises granulométricas do açobrita.

Tabela 4.3 – Análise granulométrica das amostras de açobrita (apenas com peneiramento).

Peneiras	Diâmetro (mm)	% Que passa			Limites norma DNIT ES-406/2017 e ES-407/2017		
		AB_01	AB_02	Média			
2"	50,8	100,00	100,00	100,00	100	100	± 7
1 ½"	38,1	100,00	91,08	95,54	-	-	-
1"	25,4	92,45	86,58	89,52	80	100	± 7
¾"	19,1	83,99	84,71	84,35	-	-	-
3/8"	9,5	66,11	75,51	70,81	50	85	± 7
Nº 4	4,8	54,17	63,56	58,87	35	65	± 5
Nº 10	2,0	38,99	46,12	42,56	20	50	± 5
Nº 16	1,2	33,47	38,21	35,84	-	-	-
Nº 30	0,6	25,90	28,15	27,03	-	-	-
Nº 40	0,42	22,68	23,83	23,26	5	30	± 2
Nº 60	0,25	18,14	17,67	17,91	-	-	-
Nº 100	0,15	14,34	12,88	13,61	-	-	-
Nº 200	0,074	11,28	9,33	10,31	0	15	± 2

Tabela 4.4 – Análise granulométrica das amostras de açobrita (granulometria completa).

Peneiras	Diâmetro (mm)	% Que passa			Limites norma DNIT ES-406/2017 e ES-407/2017		
		AB_03	AB_04	Média			
2"	50,8	100,00	100,00	100,00	100	100	± 7
1 ½"	38,1	93,47	100,00	96,74	-	-	-
1"	25,4	84,99	97,18	91,09	80	100	± 7
¾"	19,1	81,22	89,21	85,22	-	-	-
3/8"	9,5	65,50	68,32	66,91	50	85	± 7
Nº 4	4,8	53,68	54,91	54,30	35	65	± 5
Nº 10	2,0	39,12	39,37	39,25	20	50	± 5
Nº 16	1,2	34,05	34,31	34,18	-	-	-
Nº 30	0,6	26,95	27,23	27,09	-	-	-
Nº 40	0,42	23,75	24,04	23,90	5	30	± 2
Nº 60	0,25	18,95	19,25	19,10	-	-	-
Nº 100	0,15	14,58	14,88	14,73	-	-	-
Nº 200	0,074	10,67	10,98	10,83	0	15	± 2
-	0,0453	6,68	6,51	6,60	-	-	-
-	0,0327	5,37	4,90	5,13	-	-	-
-	0,0227	4,92	4,80	4,86	-	-	-
-	0,0163	4,92	3,94	4,43	-	-	-
-	0,0121	2,75	3,54	3,14	-	-	-
-	0,0086	1,66	2,29	1,98	-	-	-
-	0,0062	1,10	1,73	1,41	-	-	-
-	0,0044	0,61	1,15	0,88	-	-	-
-	0,0032	0,18	0,17	0,17	-	-	-
-	0,0023	0,00	0,00	0,00	-	-	-
-	0,0013	0,00	0,00	0,00	-	-	-

Examinando os resultados das análises granulométricas e as curvas granulométricas retratadas nas Figuras 4.3 e 4.4 observou-se que as amostras estão dentro dos limites da faixa granulométrica estabelecida nas Normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

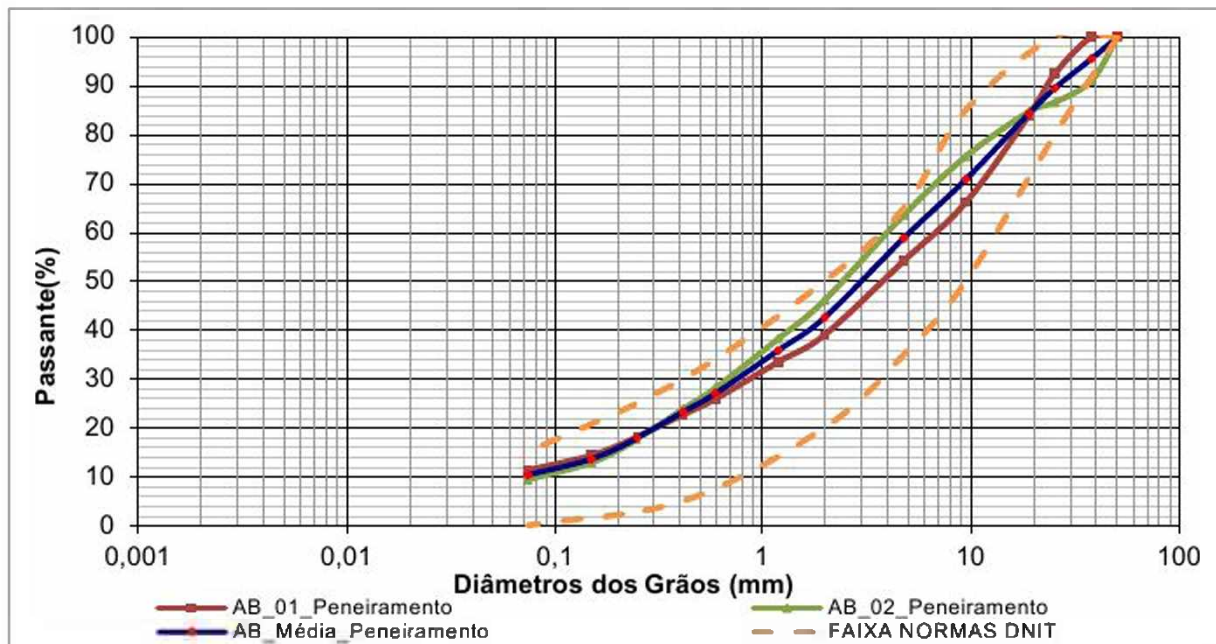


Figura 4.3 – Curvas granulométricas das amostras de açobrita (apenas com peneiramento).

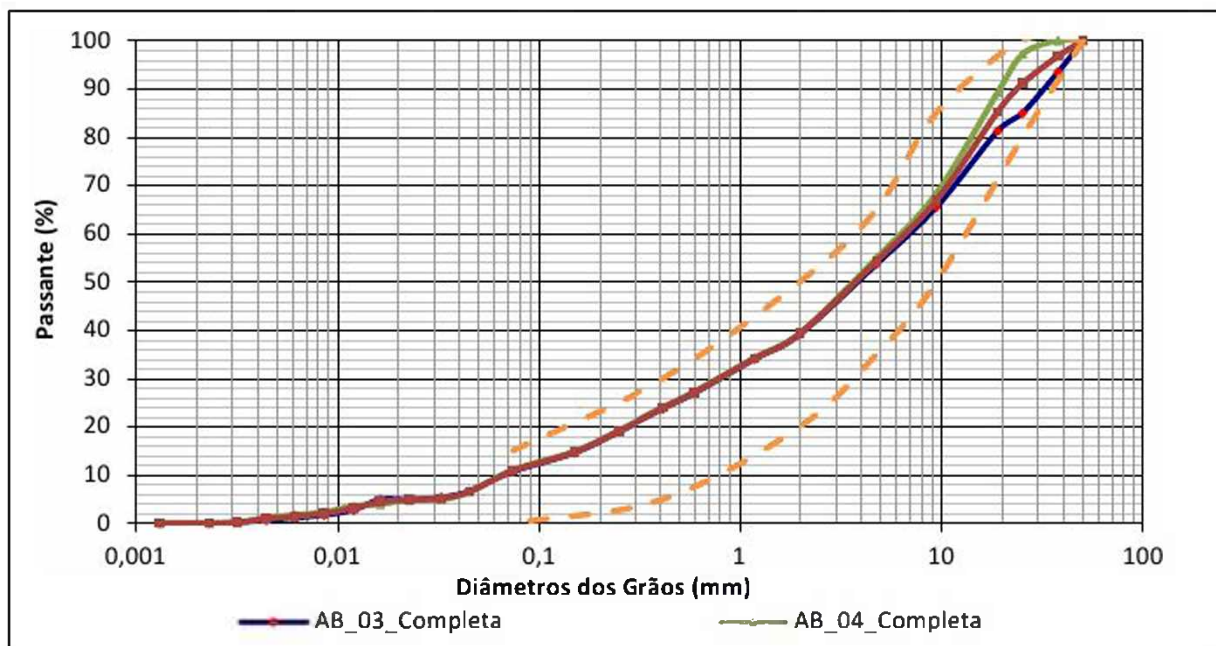


Figura 4.4 – Curvas granulométricas das amostras de açobrita (granulometria completa).

Na Tabela 4.5 é apresentado um resumo da composição granulométrica das amostras, ao mesmo tempo em que são detalhados o diâmetro máximo ( $D_{máx.}$ ), o diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) e os diâmetros correspondentes a 30% ( $D_{30}$ ) e 60% ( $D_{60}$ ) do material passante, o coeficiente de



curvatura ( $C_c$ ), o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ), limite de liquidez ( $w_L$ ), limite de plasticidade ( $w_P$ ), índice de plasticidade (IP) e o índice de grupo (IG).

Tabela 4.5 – Resumo da composição e características das amostras de açobrita.

Parâmetros			Características				Média	
			Amostras					
Granulometria	Peneiras	(% Passante)	AB 01	AB 02	AB 03	AB 04		
			2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
			1"	92,45	86,58	84,99	97,18	90,30
			3/8"	66,11	75,51	65,50	68,32	68,86
			Nº 4	54,17	63,56	53,68	54,91	56,58
			Nº 10	38,99	46,12	39,12	39,37	40,90
			Nº 40	22,68	23,83	23,75	24,04	23,58
			Nº 200	11,28	9,33	10,67	10,98	10,57
D <sub>máx.</sub> [mm]			38,1	50,8	50,8	25,4	38,1	
D <sub>10</sub> [mm]			-	0,088	0,069	0,068	0,075	
D <sub>30</sub> [mm]			0,92	0,71	0,86	0,83	0,83	
D <sub>60</sub> [mm]			7,1	4,2	7,3	6,6	6,3	
C <sub>u</sub>			-	48	106	97	84	
C <sub>c</sub>			-	1,4	1,5	1,6	1,5	
w <sub>L</sub> [%]			N/P	N/P	N/P	N/P	N/P	
w <sub>P</sub> [%]			N/P	N/P	N/P	N/P	N/P	
IP [%]			N/P	N/P	N/P	N/P	N/P	
IG			0	0	0	0	0	

A partir dos dados característicos obtidos para cada amostra foram calculados os valores médios de cada parâmetro. Para a obtenção dos valores médios de  $D_{10}$ ,  $C_c$  e  $C_u$  não foram considerados os resultados do ensaio AB\_01, dado que os resultados da granulometria por peneiramento indicaram um percentual de 11,28% passante na peneira Nº 200, tornando imprecisa à determinação do  $D_{10}$  para a amostra em especial.

Com base nos valores médios característicos calculados foi realizada a classificação do material segundo o Sistema Unificado de Classificação (SUCS). O  $C_u$  igual a 84 e o  $C_c$  igual a 1,5 caracterizam o açobrita como um material não uniforme ( $C_u > 15$ ) e bem graduado ( $1 < C_c < 3$ ). Em média 10,57% das amostras passam na peneira de abertura 0,074mm (#200) e 56,58% passam na peneira de abertura 4,8mm (#4), classificando-se o açobrita, conforme SUCS, como uma areia pouco siltosa bem graduada (SW-SM).

Em média menos de 50% do material passam na peneira de malha 2,0mm (#10), menos de 30% passam na de malha 0,42mm (#40) e menos de 15% é passante na malha 0,074mm (#200). Consequentemente, pela classificação AASHTO, como as amostras apresentarem-se como não plásticas e com índice de grupo igual a 0 (zero), o açobrita enquadra-se no grupo A-1-a, referente a um material que é predominantemente constituído por pedra britada, pedregulho e areia, que são considerados com comportamento em geral excelente e bom como subleitos.

Como resultado, à luz da avaliação da granulometria verificou-se que o açobrita apresenta comportamento adequado para utilização como camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, satisfazendo os critérios estabelecidos em norma para esta serventia.

#### 4.3.2. SOLO

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados das análises granulométricas do solo puro.

Tabela 4.6 – Análise granulométrica das amostras do solo puro (granulometria completa).

Diâmetro (mm)	% Que passa					
	Com defloculante			Sem defloculante		
	SP_01	SP_02	Média	SP_03	SP_04	Média
50,8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
9,5	97,94	99,80	98,87	97,97	99,80	98,89
4,8	94,42	97,61	96,02	94,49	97,64	96,07
2,0	87,08	90,71	88,90	87,23	90,85	89,04
1,2	85,64	87,76	86,70	85,75	88,53	87,14
0,6	82,22	83,28	82,75	81,81	84,45	83,13
0,42	80,25	81,00	80,63	79,67	82,23	80,95
0,25	76,68	77,08	76,88	76,11	78,49	77,30
0,15	73,16	73,45	73,31	72,36	74,83	73,60
0,074	65,65	65,76	65,71	65,12	68,26	66,69
0,0453	53,15	52,72	52,94	49,61	50,23	49,92
0,0327	48,70	49,25	48,98	44,94	43,58	44,26
0,0227	46,56	47,60	47,08	39,91	39,10	39,51
0,0163	44,42	45,79	45,11	37,82	35,52	36,67
0,0121	42,27	43,38	42,83	34,84	33,73	34,29
0,0086	39,80	41,42	40,61	32,11	28,34	30,23
0,0062	37,16	38,71	37,94	21,50	10,78	16,14
0,0044	33,37	35,17	34,27	2,04	5,17	3,61
0,0032	30,62	32,35	31,49	0,00	2,12	1,06
0,0023	27,36	29,67	28,52	0,00	0,00	0,00
0,0013	22,33	24,85	23,59	0,00	0,00	0,00

Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas granulométricas com as médias dos ensaios, com e sem defloculante, onde observar-se que mais de 60% do material é passante na peneira de malha 0,074mm (#200), possuindo diâmetro menor do que 0,06mm, caracterizando o solo ensaiado como um material fino.

A Tabela 4.7 apresenta a análise granulométrica do solo puro com e sem defloculante, utilizando as faixas granulométricas estabelecidas na NBR 6502 (ABNT, 1995).

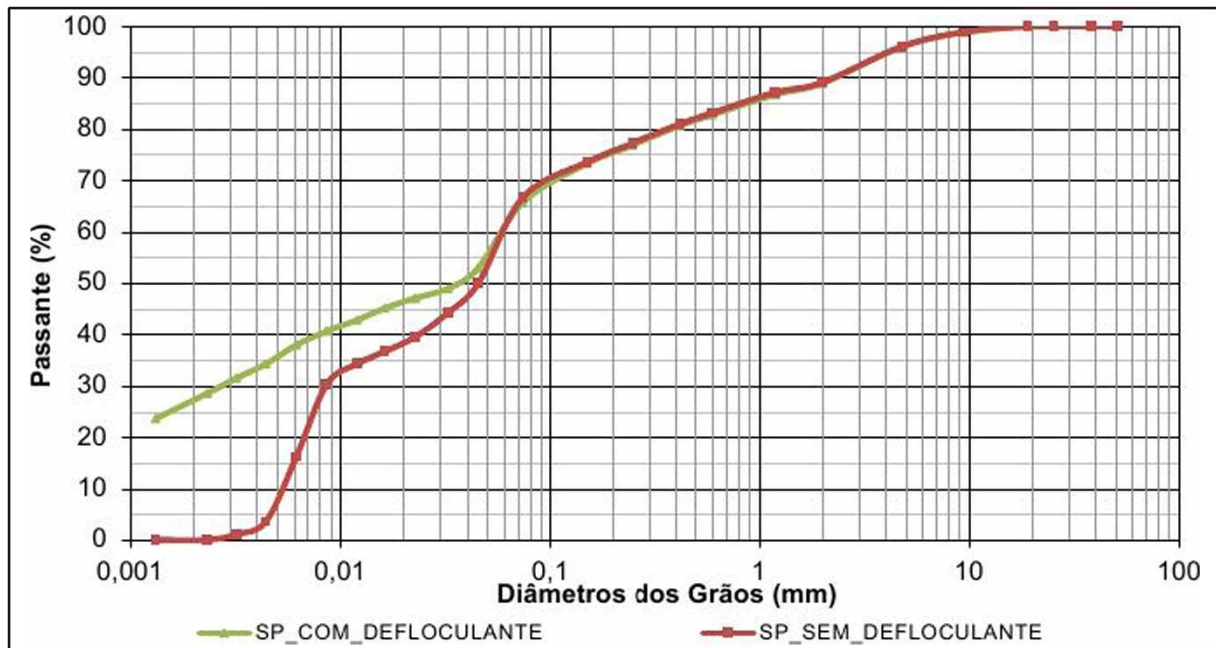


Figura 4.5 – Curvas granulométricas do solo.

Tabela 4.7 – Análise granulométrica do solo puro – NBR 6502 (ABNT, 1995).

Material	% Do material	
	Com defloculante	Sem defloculante
Pedregulho Grossa (60 - 20 mm)	0,00	0,00
Pedregulho Média (20 - 6,0 mm)	3,26	3,22
Pedregulho Fina (6,0 - 2,0 mm)	7,85	7,75
Areia Grossa (2,0 - 0,6 mm)	6,15	5,91
Areia Média (0,6 - 0,2 mm)	7,66	7,68
Areia Fina (0,2 - 0,06 mm)	10,79	10,03
Silte (0,06 - 0,002mm)	37,39	65,42
Argila (< 0,002 mm)	26,91	0,00

Verificou-se, em uma análise conjunta da Figura 4.5 e da Tabela 4.7, uma diferença entre as porcentagens do material mais fino obtida com e sem uso de defloculante, o que indica a existência de agregações nas partículas, que são desfeitas através da ação do defloculante.

Os percentuais de 65,42% e 0,00%, referentes a silte e argila, respectivamente, apresentados na Tabela 4.7 relativos ao ensaio sem defloculante em comparação aos percentuais de 37,39% e 26,91%, de silte e argila, respectivamente, relativos ao ensaio com defloculante, demonstram este nível de agregação característico do solo ensaiado, sinalizando a natureza de um solo tropical bastante intemperizado.

Na Tabela 4.8 é apresentado um resumo da composição granulométrica, ao mesmo tempo em que são expostas algumas características das amostras do solo puro.

Tabela 4.8 – Resumo da composição e características das amostras de solo puro.

Parâmetros			Características				Média
			Amostras				
			SP 01	SP 02	SP 03	SP 04	
Granulometria	Peneiras	(%) Passante					
		2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		3/8"	97,94	99,80	97,97	99,80	98,88
		Nº 4	94,42	97,61	94,49	97,64	96,04
		Nº 10	87,08	90,71	87,23	90,85	88,97
		Nº 40	80,25	81,00	79,67	82,23	80,79
		Nº 200	65,65	65,76	65,12	68,26	66,20
	w <sub>L</sub> [%]	34	36	-	-	-	
	w <sub>P</sub> [%]	27	28	-	-	-	
	IP [%]	7	8	-	-	-	
	IG	4	5	-	-	-	

Em média mais de 35 % do material passa na peneira de malha 0,074mm (#200), o w<sub>L</sub> e o IP foram de 36% e 8%, respectivamente. Consequentemente, pela classificação AASHTO, em virtude de as amostras apresentarem um IG máximo de 5 (cinco), o solo estudado enquadra-se no grupo A-4, referente a um solo siltoso, que são considerados com comportamento em geral fraco e pobre como subleitos.

Com base nos valores médios característicos calculados foi realizada a classificação do material segundo o Sistema Unificado de Classificação (SUCS). Em média 66,20% das amostras passa na peneira de abertura 0,074mm (#200), w<sub>L</sub> máximo obtido foi menor do que 50% e o IP máximo é igual a 8 %, classificando-se o solo ensaiado, conforme SUCS, como um solo siltoso de baixa plasticidade (ML). Esta classificação também pode ser verificada na carta de plasticidade de Casagrande (Figura 4.6).

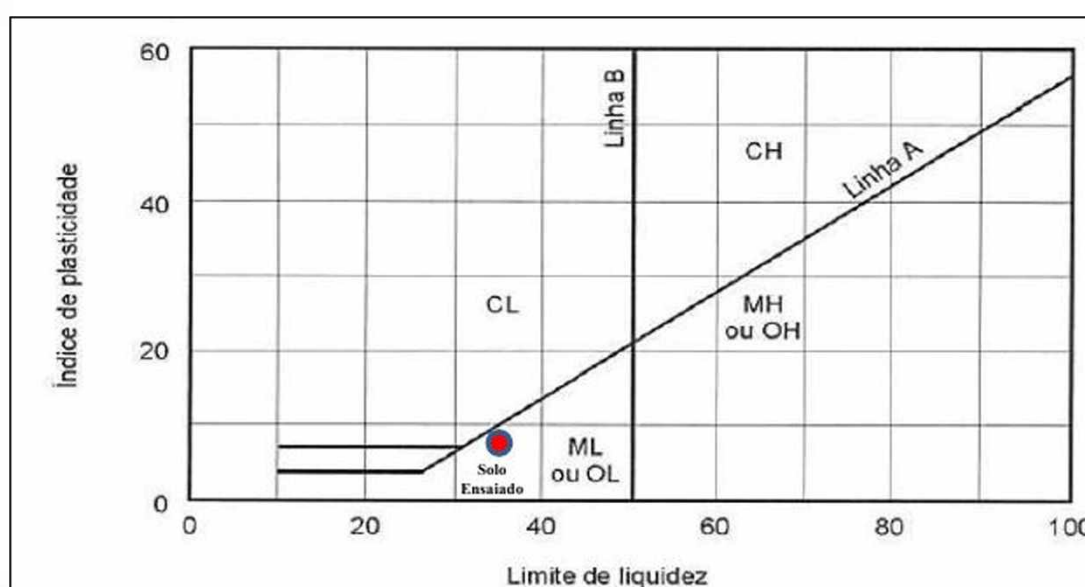


Figura 4.6 – Carta de plasticidade de Casagrande.

A classificação do material como um solo siltoso de baixa plasticidade (ML) é corroborada através da análise granulométrica apresentada na Tabela 4.7, onde é mostrada que, nos ensaios com uso de defloculante, em média a fração siltosa predomina sobre a argilosa, com percentuais de material de 37,39% para a primeira e 26,91% para a segunda.

A norma ES-141 (DNIT, 2010) preconiza que os materiais devem satisfazer a uma das faixas recomendadas na Tabela 2.22. Logo, à luz da granulometria, examinou-se que o solo puro ensaiado não possui condições adequadas para utilização como constituinte de camadas de base para pavimentos rodoviários, por não se enquadrar em nenhuma das faixas granulométricas estipuladas para esta serventia.

### 4.3.3. MISTURA M4060

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados das análises granulométricas, a média por tipo de ensaio e a média total para as amostras da mistura M4060.

Tabela 4.9 – Análise granulométrica da mistura M4060.

Diâmetro (mm)	% Que passa						Média Total
	Apenas peneiramento			Peneiramento + Sedimentação			
	M4060 01	M4060 02	Média	M4060 03	M4060 04	Média	
50,8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,4	95,49	98,02	96,76	100,00	97,97	98,99	97,87
19,1	92,90	97,47	95,19	96,42	95,17	95,80	95,49
9,5	87,30	90,49	88,90	89,44	88,90	89,17	89,03
4,8	79,00	81,97	80,49	83,34	82,35	82,85	81,67
2,0	66,29	67,53	66,91	72,59	71,40	72,00	69,45
1,2	61,91	62,86	62,39	67,78	67,09	67,44	64,91
0,6	55,96	55,98	55,97	61,24	60,99	61,12	58,54
0,42	53,17	52,77	52,97	58,21	58,14	58,18	55,57
0,25	48,88	47,73	48,31	53,78	54,01	53,90	51,10
0,15	44,90	43,16	44,03	49,77	50,39	50,08	47,06
0,074	39,86	37,86	38,86	41,97	45,46	43,72	41,29
0,0453	-	-	-	35,90	34,66	35,28	-
0,0327	-	-	-	33,42	31,48	32,45	-
0,0227	-	-	-	31,53	29,39	30,46	-
0,0163	-	-	-	29,45	27,01	28,23	-
0,0121	-	-	-	27,80	25,12	26,46	-
0,0086	-	-	-	26,21	23,23	24,72	-
0,0062	-	-	-	24,11	21,34	22,72	-
0,0044	-	-	-	21,53	18,55	20,04	-
0,0032	-	-	-	18,70	17,01	17,86	-
0,0023	-	-	-	16,62	14,47	15,55	-
0,0013	-	-	-	12,60	8,16	10,38	-

Examinando os resultados das análises granulométricas observou-se que o percentual da mistura passante na peneira de malha 0,074mm (#200) não satisfaz nenhuma das faixas granulométricas estabelecidas nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), conforme Tabela 2.22.

A Tabela 4.10 apresentada um resumo da composição granulométrica e características das amostras da mistura M4060.

Tabela 4.10 – Resumo da composição e características das amostras da mistura M4060.

Parâmetros			Características				Média
			Amostras				
			M4060 01	M4060 02	M4060 03	M4060 04	
Granulometria	Peneiras	(%) passante					
		2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		1"	95,49	98,02	100,00	97,97	97,87
		3/8"	87,30	90,49	89,44	88,90	89,03
		Nº 4	79,00	81,97	83,34	82,35	81,67
		Nº 10	66,29	67,53	72,59	71,40	69,45
		Nº 40	53,17	52,77	58,21	58,14	55,57
	Nº 200	39,86	37,86	41,97	45,46	41,29	
	LL [%]	N/P	N/P	N/P	N/P	N/P	
	LP [%]	N/P	N/P	N/P	N/P	N/P	
	IP [%]	N/P	N/P	N/P	N/P	N/P	
	IG	1	1	2	3	2	

Examinando os parâmetros de aceitabilidade solicitados pelas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), no que se refere às faixas granulométricas, verifica-se que estes foram extraídos da norma ES-141/2010, que estabelece parâmetros para os materiais constituintes de camadas de base de pavimentos rodoviários, sejam solos, misturas de solos, ou mistura de solos e materiais britados. Já a ES-139 (DNIT, 2010), que estabelece condições para constituição de sub-bases, não apresenta limitações no que se refere a faixas granulométricas, indicando apenas que os materiais devem possuir IG igual a zero.

Pela AASHTO, a mistura enquadra-se no grupo A-4, equiparado a um solo siltoso. O IG médio da mistura foi igual a 2 (dois). Neste sentido, a mistura M4060, mesmo se tratada como mistura de solos e materiais britados, o que o é, pois o açobrita é um produto da britagem da escória de aciaria, não atende as características necessárias para utilização como sub-base de pavimentos rodoviários, estabilizada granulometricamente, conforme padrões preconizados na ES-139 (DNIT, 2010). Contudo, decidiu-se manter a programação experimental para a mistura, a fim de verificar o comportamento desta em relação às outras misturas, no que se refere ao comportamento físico e mecânico.

#### 4.3.4. MISTURA M5050

Na Tabela 4.11 são apresentados os resultados das análises granulométricas, a média por tipo de ensaio e a média total para as amostras da mistura M5050.

Tabela 4.11 – Análise granulométrica da mistura M5050.

Diâmetro (mm)	% Que passa						Média Total
	Apenas peneiramento			Peneiramento + Sedimentação			
	M5050 01	M5050 02	Média	M5050 03	M5050 04	Média	
50,8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,4	97,87	98,04	97,96	89,74	96,85	93,30	95,63
19,1	95,42	95,95	95,69	86,05	91,50	88,78	92,23
9,5	86,21	89,18	87,70	78,47	85,76	82,12	84,91
4,8	78,51	81,76	80,14	72,50	77,97	75,24	77,69
2,0	66,16	69,00	67,58	61,16	66,29	63,73	65,65
1,2	61,39	63,64	62,52	57,12	61,76	59,44	60,98
0,6	55,10	56,46	55,78	51,37	54,29	52,83	54,31
0,42	52,09	52,98	52,54	48,49	50,57	49,53	51,03
0,25	47,62	47,63	47,63	43,99	44,83	44,41	46,02
0,15	43,35	42,68	43,02	40,00	39,33	39,67	41,34
0,074	37,90	36,38	37,16	34,10	31,61	32,86	35,00
0,0453	-	-	-	22,33	24,10	23,21	-
0,0327	-	-	-	18,79	20,36	19,58	-
0,0227	-	-	-	16,35	18,27	17,31	-
0,0163	-	-	-	14,76	16,81	15,78	-
0,0121	-	-	-	13,24	14,63	13,93	-
0,0086	-	-	-	12,48	13,17	12,83	-
0,0062	-	-	-	10,90	11,77	11,33	-
0,0044	-	-	-	9,71	10,07	9,89	-
0,0032	-	-	-	8,46	8,85	8,66	-
0,0023	-	-	-	6,80	7,39	7,10	-
0,0013	-	-	-	5,15	5,35	5,25	-

Examinando os resultados das análises granulométricas observou-se que o percentual da mistura passante na peneira de malha 0,074mm (#200) não satisfaz nenhuma das faixas granulométricas estabelecidas nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

A Tabela 4.12 apresenta um resumo da composição granulométrica das amostras, ao mesmo tempo em que são expostas algumas características da mistura M5050.

Tabela 4.12 – Resumo da composição e características das amostras da mistura M5050.

Parâmetros			Características					ES114/2009 e ES115/2009		
			Amostras					Média	Faixa B	Tolerância
			M5050 01	M5050 02	M5050 03	M5050 04				
Granulometria	Peneiras	Passante (%)	2"	100,00	100,00	100,00	100,00	<b>100,00</b>	-	-
			1"	97,87	98,04	89,74	96,85	<b>95,63</b>	100	± 7
			3/8"	86,21	89,18	78,47	85,76	<b>84,91</b>	60-100	± 7
			Nº 4	78,51	81,76	72,50	77,97	<b>77,69</b>	50-85	± 5
			Nº 10	66,16	69,00	61,16	66,29	<b>65,65</b>	40-70	± 5
			Nº 40	52,09	52,98	48,49	50,57	<b>51,03</b>	25-50	± 2
			Nº 200	37,90	36,38	34,10	31,61	<b>35,00</b>	10-35	± 2
	w <sub>L</sub> [%]		N/P	N/P	N/P	N/P	N/P			
	w <sub>P</sub> [%]		N/P	N/P	N/P	N/P	N/P			
	IP [%]		N/P	N/P	N/P	N/P	N/P			
	IG		1	1	0	0	0			

Na classificação AASHTO a mistura M5050 enquadra-se no grupo A-2-4, equivalente a materiais que predominam areia siltosa ou argilosa, considerada com comportamento em geral excelente e bom como subleito. O IG médio da mistura obtido foi igual a 0 (zero). Verificou-se, desta forma, que a mistura M5050, se tratada como mistura de solos e materiais britados, atenderia as características necessárias para utilização como sub-base, de pavimentos rodoviários, estabilizada granulometricamente, conforme padrões estabelecidos na ES-139 (DNIT, 2010).

Foi realizada uma análise da compatibilidade granulométrica da mistura com os parâmetros estipulados nas normas ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009), as quais definem a sistemática utilizada na execução de camadas de sub-base e base, respectivamente, de pavimentos utilizando escória de aciaria LD, produzida na ARCELOMITTAL-TUBARÃO, com redução de expansão – ACERITA® estabilizada granulometricamente, para utilização em rodovias com  $N < 5 \times 10^6$ . Na Tabela 2.18 são apresentadas as duas faixas granulométricas, denominadas de A e B, as quais as misturas de (Acerita® + Solo) devem satisfazer, conforme especificações ES 114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009).

Observou-se que a granulometria média da mistura M5050 está dentro dos limites de tolerância estipulados para a faixa B (Tabela 4.12). Logo, adotando-se como parâmetro as referidas especificações, a mistura estudada, no que se refere a granulometria, apresenta as características requeridas para utilização em camadas de base e sub-base utilizadas em rodovias com  $N < 5 \times 10^6$ .



### 4.3.5. MISTURA M6040

Na Tabela 4.13 são apresentados os resultados das análises granulométricas, a média por tipo de ensaio e a média total para as amostras da mistura M6040.

Tabela 4.13 – Análise granulométrica da mistura M6040.

Diâmetro (mm)	% Que passa						Média Total
	Apenas peneiramento			Peneiramento + Sedimentação			
	M6040 01	M6040 02	Média	M6040 03	M6040 04	Média	
50,8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,4	94,06	97,69	95,88	97,30	98,20	97,75	96,81
19,1	92,38	93,61	93,00	97,30	92,27	94,79	93,89
9,5	77,32	80,30	78,81	87,53	82,25	84,89	81,85
4,8	67,59	71,61	69,60	80,79	74,39	77,59	73,60
2,0	56,78	59,18	57,98	68,58	62,07	62,33	61,65
1,2	51,34	53,66	52,50	62,24	56,11	59,18	55,84
0,6	44,70	46,64	45,67	54,86	48,57	51,72	48,69
0,42	41,58	43,38	42,48	51,55	45,07	48,31	45,40
0,25	36,77	38,32	37,55	46,61	39,94	43,28	40,41
0,15	32,28	33,88	33,08	42,21	35,26	38,74	35,91
0,074	27,19	28,89	28,04	37,05	29,12	33,09	30,56
0,0453	-	-	-	27,84	27,58	27,71	-
0,0327	-	-	-	25,01	25,76	25,38	-
0,0227	-	-	-	23,73	23,78	23,75	-
0,0163	-	-	-	21,53	22,29	21,91	-
0,0121	-	-	-	20,44	20,97	20,70	-
0,0086	-	-	-	18,70	19,29	18,99	-
0,0062	-	-	-	16,13	18,16	17,15	-
0,0044	-	-	-	14,81	16,35	15,58	-
0,0032	-	-	-	12,80	14,73	13,77	-
0,0023	-	-	-	11,23	12,68	11,96	-
0,0013	-	-	-	8,34	9,97	9,16	-

Examinando os resultados das análises granulométricas observou-se que o percentual da mistura passante na peneira de malha 0,074mm (#200) não satisfaz nenhuma das faixas granulométricas estabelecidas nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

Na Tabela 4.14 é apresentado um resumo da composição granulométrica das amostras, ao mesmo tempo em que são expostas algumas características da mistura M6040.

Tabela 4.14 – Resumo da composição e características das amostras da mistura M6040.

Parâmetros			Características					ES114/2009 e ES115/2009		
			Amostras					Média	Faixa B	Tolerância
			M5050 01	M5050 02	M5050 03	M5050 04				
Granulometria	Peneiras	(%) Passante	2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-	-
		1"	94,06	97,69	97,30	98,20	96,81	100	± 7	
		3/8"	77,32	80,30	87,53	82,25	81,85	60-100	± 7	
		Nº 4	67,59	71,61	80,79	74,39	73,60	50-85	± 5	
		Nº 10	56,78	59,18	68,58	62,07	61,65	40-70	± 5	
		Nº 40	41,58	43,38	51,55	45,07	45,40	25-50	± 2	
		Nº 200	27,19	28,89	37,05	29,12	30,56	10-35	± 2	
	w <sub>L</sub> [%]	N/P	N/P	N/P	N/P	N/P				
	w <sub>P</sub> [%]	N/P	N/P	N/P	N/P	N/P				
	IP [%]	N/P	N/P	N/P	N/P	N/P				
	IG	0	0	1	0	0				

Conforme classificação AASHTO, a mistura M6040 enquadra-se no grupo A-2-4. O IG médio da mistura obtido foi igual a 0 (zero). Verificou-se, desta forma, que a mistura M6040, se tratada como mistura de solos e materiais britados, atende as características necessárias para utilização como sub-base, de pavimentos rodoviários, estabilizada granulometricamente, conforme padrões estabelecidos na ES-139 (DNIT, 2010).

Verificou-se que a granulometria média da mistura estudada está dentro dos limites de tolerância estipulados para a faixa B das especificações ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009), conforme Tabela 4.14. Desta forma, adotando-se como parâmetro as referidas especificações, verificou-se que a mistura M6040 apresenta as características requeridas para utilização em camadas de base e sub-base utilizadas em rodovias com  $N < 5 \times 10^6$ .

#### 4.4. DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

A Tabela 4.15 apresenta as médias dos resultados obtidos nos ensaios para determinação da densidade real do grão do açobrita, solo e misturas, realizados conforme metodologia prescrita na norma ME-093 (DNER, 1994).

Observou-se uma densidade real dos grãos de açobrita igual a 3,331. Segundo Rohde (2002), as propriedades físicas características das escórias de aciaria – densidade, granulometria e propriedades estruturais – variam com a maneira como é feito o resfriamento deste resíduo, ela

obteve valores de densidade real dos grãos de escória de aciaria variando entre 3,39 a 3,52, utilizando a metodologia descrita nas normas ME-081 (DNER, 1994) e ME-084 (DNER, 1994).

Tabela 4.15 – Resumos dos ensaios para determinação da densidade real dos grãos ME-093 (DNER, 1994).

<b>Material</b>	<b>Densidade real dos grãos</b>
Açobrita	3,331
Mistura M6040	2,986
Mistura M5050	2,969
Mistura M4060	2,922
Solo Tropical	2,797

Conforme esperado, com a diminuição da fração de açobrita em cada mistura, observou-se um decréscimo da densidade real dos grãos para as misturas estudadas.

Para o solo tropical a densidade real dos grãos igual 2,797 representa um valor alto se comparado a média dos solos brasileiros. Este valor pode ser explicado pela presença de óxido de ferro e outros minérios pesados no solo, característica da região de origem do material, o que eleva o valor da densidade real dos grãos. Tarazona (2016), utilizando o pentapicnômetro, apresenta valor de densidade real dos grãos de solo média igual a 2,751 para solo tropical oriunda do subleito da BR-381/MG. Resende (2010) apresenta valor de Gs igual 2,670 para uma argila utilizada no subleito de rodovias do estado de Minas Gerais.

Para verificar a variabilidade da densidade real dos grãos de açobrita foram realizados ensaios com Pentapicnômetro para determinação da densidade do açobrita e das misturas de açobrita e solo tropical. Os valores estão apresentados nas Tabelas 4.16 e 4.17.

No geral, verificou-se o crescimento do Gs com o crescimento do tamanho médio das partículas, tanto no açobrita quanto nas misturas.

Tabela 4.16 – Resumos das análises para determinação da densidade real dos grãos de açobrita com Pentapicnômetro.

<b>Tamanho (mm)</b>		<b>Densidade real dos grãos</b>			
<b>Passante</b>	<b>Retido</b>	<b>Ensaio</b>			<b>Média</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
19,1	9,5	3,795	3,756	3,781	
9,5	4,8	3,759	3,789	3,887	3,812
4,8	2,0	3,789	3,797	3,856	3,814
2,0	1,2	3,623	3,723	3,662	3,669
1,2	0,6	3,631	3,603	3,623	3,619
0,6	0,42	3,336	3,301	3,363	3,333
0,42	0,30	3,326	3,254	3,294	3,291
0,30	0,15	3,217	3,223	3,225	3,222
0,15	0,074	3,125	3,119	3,123	3,122
					<b>3,518</b>
					<b>3,376</b>

Tabela 4.17 – Resumos das análises para determinação da densidade real dos grãos das misturas de açobrita e solo tropical com Pentapicnômetro.

Tamanho (mm)		Densidade real dos grãos		
Passante	Retido	Ensaio		
		M4060	M5050	M6040
19,1	9,5	3,507	3,531	3,694
9,5	4,8	3,342	3,409	3,541
4,8	2,0	3,252	3,404	3,457
2,0	1,2	3,297	3,344	3,508
1,2	0,6	3,174	3,319	3,293
0,6	0,42	3,052	3,109	3,159
0,42	0,30	3,071	3,066	3,066
0,30	0,15	3,057	3,066	3,094
0,15	0,074	2,964	2,948	2,967
<b>Média</b>		<b>3,191</b>	<b>3,244</b>	<b>3,309</b>

Observou-se um valor médio de densidade real dos grãos passantes na peneira de abertura 2,00mm igual a 3,376, obtida com utilização do Pentapicnômetro, este valor é muito próximo ao valor de 3,331, determinado conforme metodologia ME-093 (DNER, 1994). As normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017) não especificam limites para Gs do açobrita ou mistura de açobrita e solos.

#### 4.5. ABSORÇÃO

Na Tabela 4.18 são apresentados os resultados dos ensaios para determinação do percentual de absorção de água do açobrita. Para determinação do percentual médio de absorção de água foram realizados três ensaios utilizando a metodologia descrita na norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), obtendo-se uma média de 1.85% para o material.

Tabela 4.18 – Resultados das determinações de absorção de água do açobrita.

Absorção de água (%)			
1	2	3	MÉDIA
1,75	1,97	1,83	1,85

As normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017) não especificam limites para o percentual de absorção de água do açobrita ou mistura de açobrita e solos, porém, a norma EM-262 (DNER, 1994), que apresenta requisitos gerais e específicos concernentes a escória de aciaria a serem aplicadas em camadas de pavimento, especifica que a absorção de água para este fim deve variar entre 1% a 2%.

#### 4.6. CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS – METOLOGIA MCT

Na Figura 4.7 são apresentadas as curvas de mini-MCV, traçadas a partir dos resultados obtidos no ensaio para solos compactados em equipamentos miniatura – mini-MCV, conforme metodologia descrita na norma ME-258 (DNER, 1994).

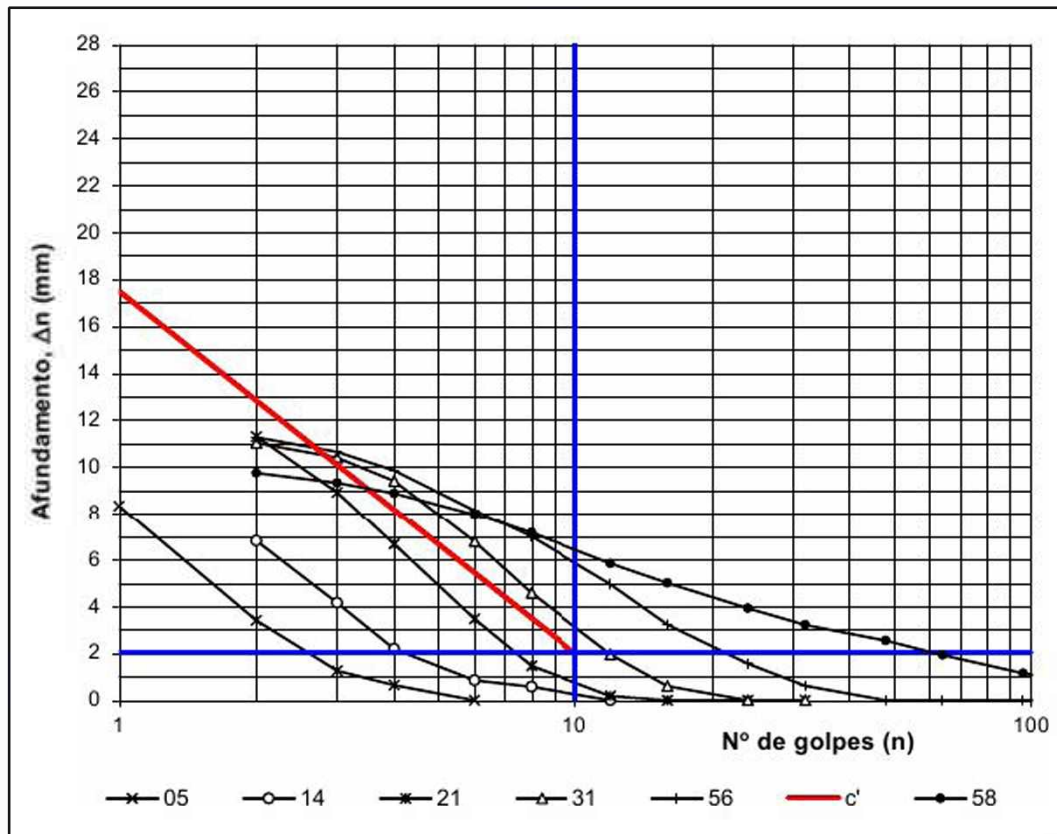


Figura 4.7 – Curvas de compactação mini-MCV.

Na Tabela 4.19 estão apresentados os resultados do ensaio mini-MCV, com as respectivas umidades e a massa específica aparente seca das amostras. Com os resultados foram traçadas as famílias de curvas de compactação, correspondente as linhas de massa específica aparente seca pelo teor de umidade, conforme gráfico da Figura 4.8.

A partir das curvas de mini-MCV e família de curvas de compactação foram obtidas as retas médias para determinação dos índices  $c'$  (coeficiente angular da parte mais inclinada da curva mini-MCV) e  $d'$  (coeficiente angular da parte mais retilínea (ou assimilável a uma reta) mais inclinada do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes), respectivamente. Na Tabela 4.20 são apresentados os valores obtidos.

Tabela 4.19 – Resultados mini-MCV e massa específica aparente seca das amostras.

Mini-MCV	4,0	6,2	8,7	10,6	13,2	17,7	
Umidade (%)	28,8	27,2	24,3	23,0	20,7	18,4	
Massa específica aparente seca (kg/cm <sup>3</sup> )							
Nº Golpes	6	1,536	1,558	1,531	1,473	1,456	1,436
	8	1,536	1,567	1,591	1,533	1,510	1,484
	<b>12</b>	<b>1,536</b>	<b>1,584</b>	<b>1,631</b>	<b>1,611</b>	<b>1,585</b>	<b>1,552</b>
	16	1,536	1,584	1,637	1,654	1,638	1,599
	24	0,000	1,584	1,637	1,674	1,692	1,656

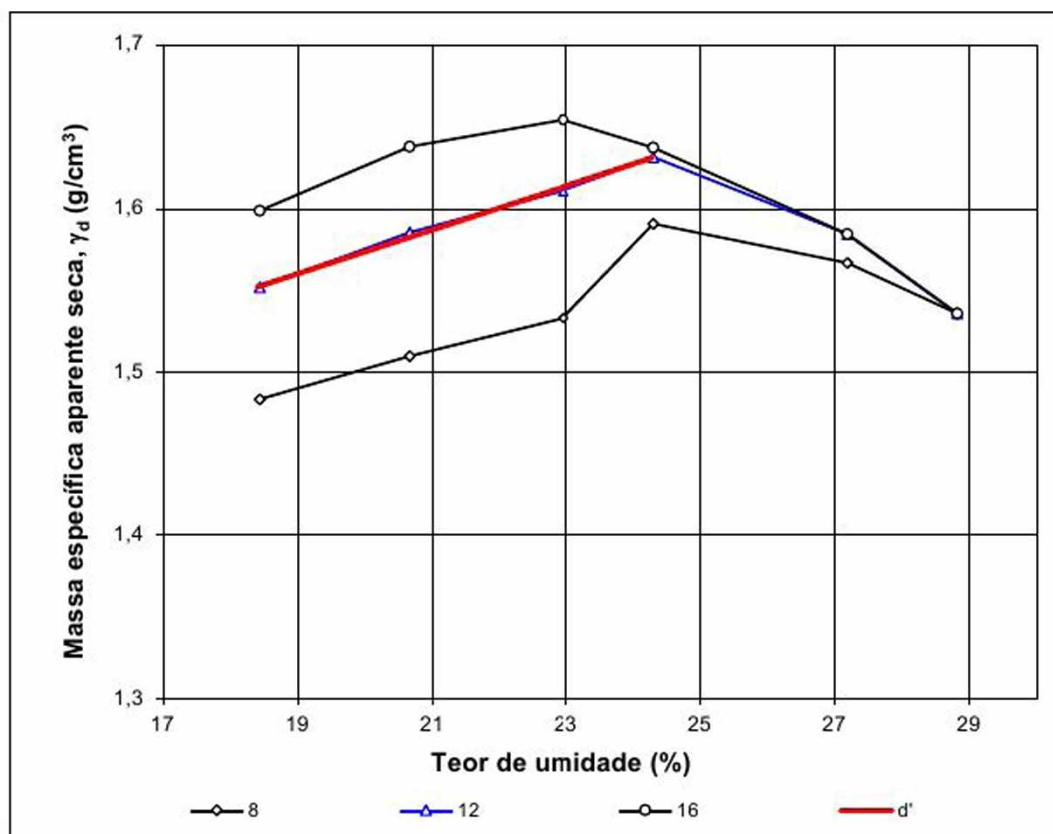


Figura 4.8 – Família de curvas de compactação.

Tabela 4.20 – Retas médias para determinação dos índices  $c'$  e  $d'$ .

Retas médias para determinação dos índices	X	Y
Reta do Gráfico: Nº de Golpes x Afundamento	1	17,5
$c' = 1,55$	10	2
Reta do Gráfico: Umidade x Massa Esp. Apar. Seca	18,4	1,552
$d' = 13,39$	24,3	1,631

Com os valores apresentados na Tabela 4.19, traçou-se ainda a curva mini-MCV X umidade de compactação (Figura 4.9).

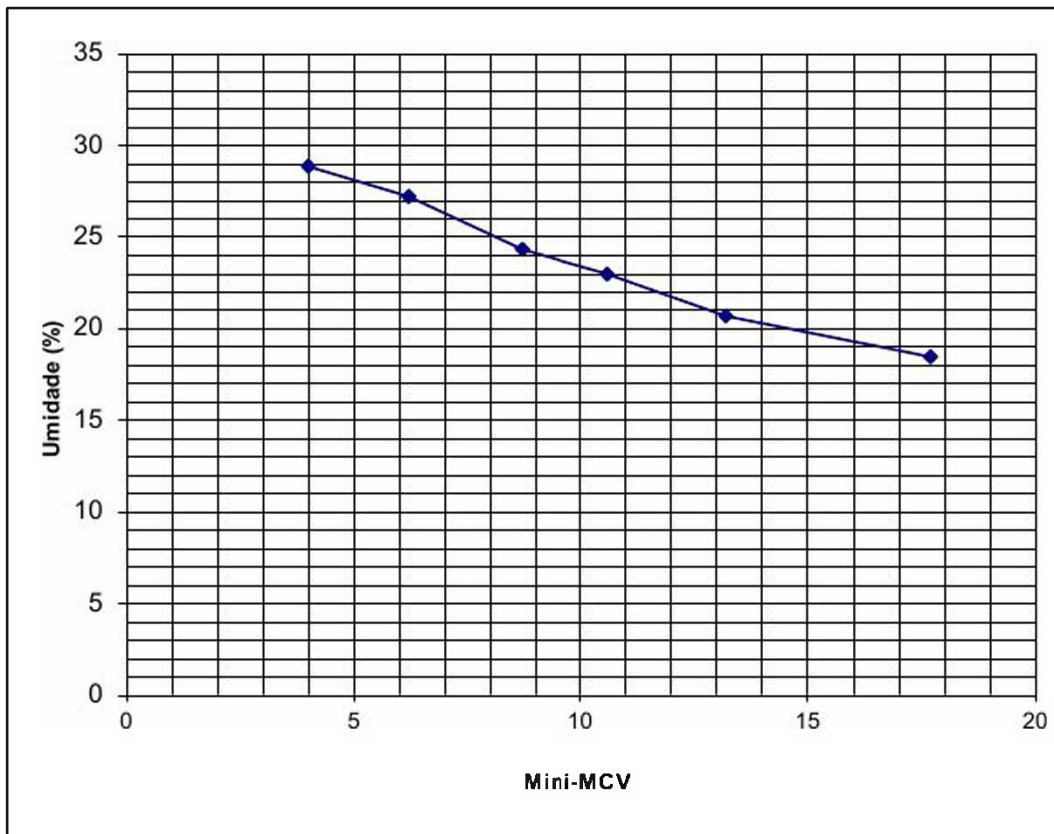


Figura 4.9 – Curva mini-MCV x umidade de compactação.

A partir dos resultados de perda de massa por imersão em água (Tabela 4.21) obtidos conforme metodologia prescrita na norma ME-256 (DNER, 1994) foi confeccionada a curva que representa a perda de massa por imersão em função do mini-MCV (Figura 4.10).

Tabela 4.21 – Resultados mini-MCV e perda de massa por imersão.

<b>Mini-MCV</b>	4,0	6,2	8,7	10,6	13,2	17,7
<b>PI (%)</b>	159,3	130,2	105,6	94,1	86,1	103,9

Da curva de mini-MCV x Perda de massa por imersão foi extraído o valor de PI (%) igual a 97%, correspondente ao mini-MCV igual a 10, conforme determinado pela norma CLA-259 (DNER, 1994), a qual define que o valor de PI (%) a ser utilizado na classificação dos solos deve ser o mini-MCV=10 para os solos com massa específica aparente úmida baixa, isto é, quando o corpo-de-prova no ensaio de compactação mini-MCV nessas condições tiver altura superior a 53mm.

Com os valores obtidos para PI (%) e  $d'$  calculou-se o coeficiente  $e'$  igual a 1,35. A partir dos valores de  $e'$  e  $c'$ , com o auxílio do quadro para classificação de solos tropicais conforme metodologia MCT (Figura 4.11), realizou-se a classificação das amostras ensaiadas. O solo enquadrou-se como **NG'**, solo argiloso não laterítico.

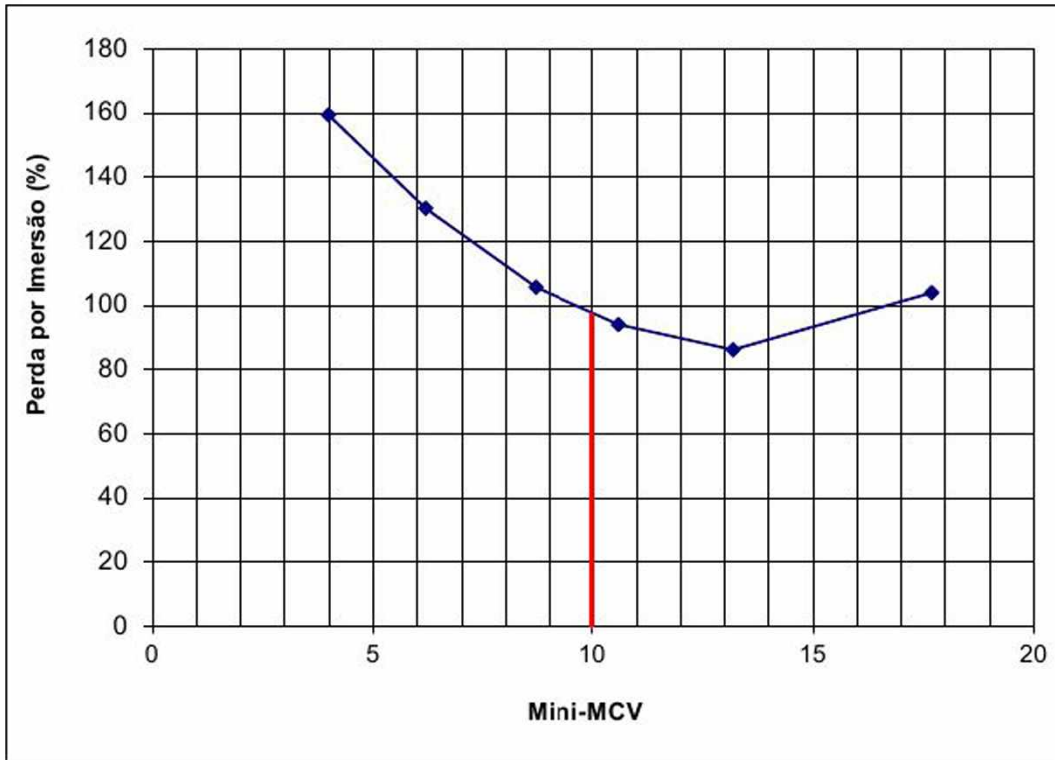


Figura 4.10 – Curva mini-MCV x perda de massa por imersão.

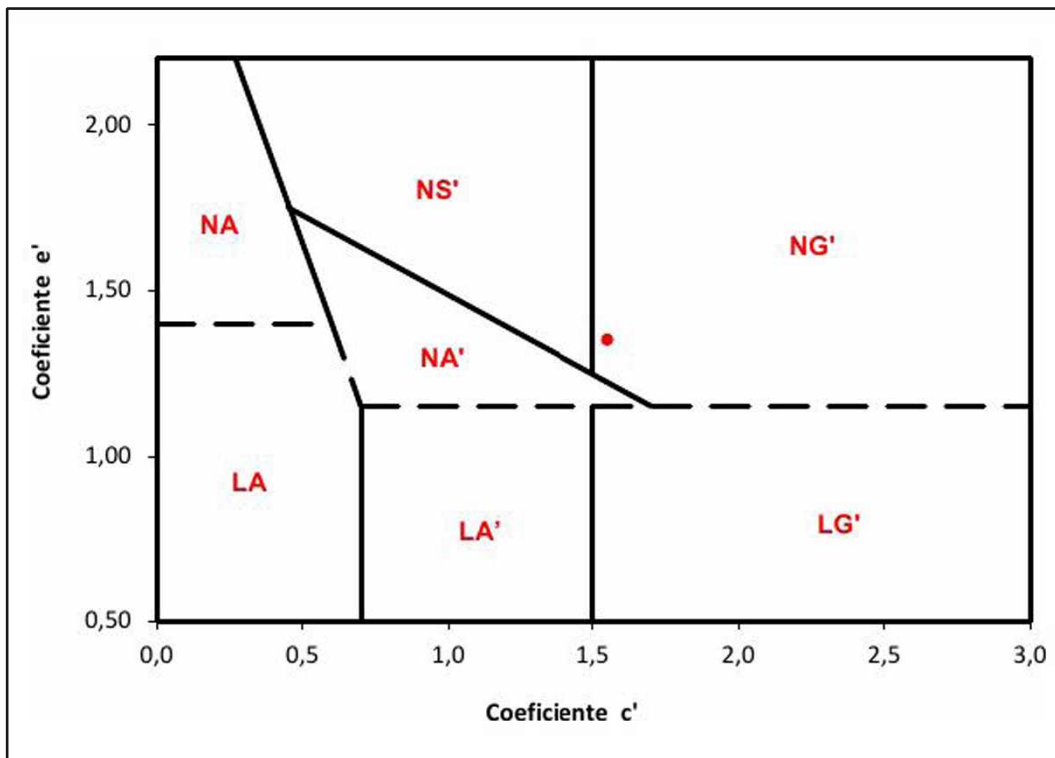


Figura 4.11 – Classificação metodológica MCT.

Logo, pode-se caracterizar o solo estudado como um solo tropical com estrutura herdada do maciço rochoso que lhe deu origem, que passou por um processo de intemperismo. Com base



na granulometria do solo (Tabela 4.7) pode-se associar as características do solo estudado as de uma rocha matriz basaltos, biabásicos, com estrutura pseudo-estratificadas disposta em camadas verticais, conforme dados disponibilizados pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) (Nogami e Villibor, 1995).

#### 4.7. RESISTÊNCIA À ABRASÃO “LOS ANGELES”

Para análise da resistência mecânica ao desgaste sofrido pelo açobrita, quando colocado na máquina “Los Angeles” foi realizado ensaio conforme metodologia prescrita na norma ME-035 (DNER, 1998). Nos ensaios determinou-se um valor de abrasão igual a 28%.

Nas Figuras 4.12(a) e 4.12(b) são apresentados os materiais antes e após o ensaio de abrasão “Los Angeles”, verificou-se que as frações mais finas sofreram maior desgaste por abrasão.



Figura 4.12 – Açobrita na graduação A (a) antes e (b) após o ensaio de abrasão “Los Angeles”.

As normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017) determinam que o açobrita deve apresentar desgaste inferior a 55%, quando submetidos ao ensaio de Abrasão “Los Angeles” (DNER-ME 035/98). Portanto, o material apresenta resistência mecânica ao desgaste adequada a utilização como base e sub-base de pavimentos rodoviários.

#### 4.8. COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Foram realizados ensaios de compactação no açobrita, solo e misturas utilizando a energia de compactação do Método C – Modificada, com amostras não trabalhadas, sem reuso, conforme metodologia da norma ME-164 (DNIT, 2013).

Após os ensaios de compactação foram realizadas as determinações do Índice de Suporte Califórnia (ISC), utilizando os corpos de prova ensaiados para construção da curva de compactação, conforme metodologia da norma ME-172 (DNIT, 2016).

##### 4.8.1. AÇOBRITA

Na Figura 4.13 são mostrados, através da curva de compactação, os resultados do ensaio de compactação realizado no açobrita.

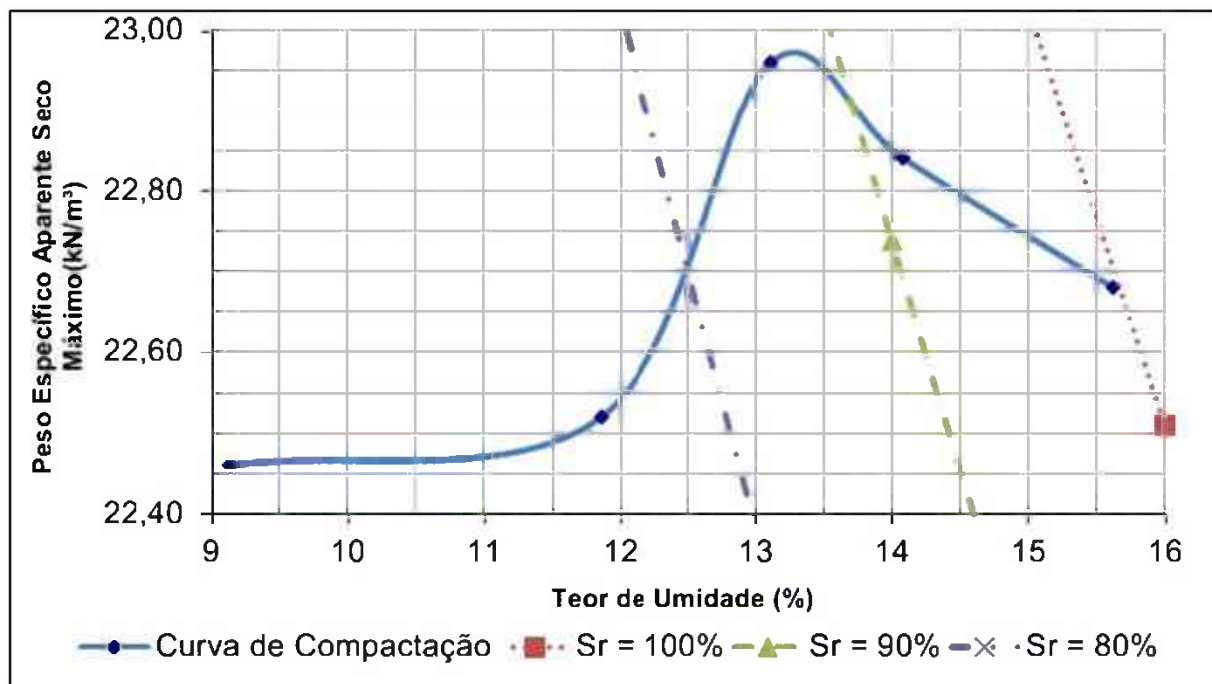


Figura 4.13 – Curva de compactação do açobrita.

Determinou-se o valor do peso específico máximo aparente seco igual 22,98kN/m<sup>3</sup> e da umidade ótima de compactação igual a 13,3% para o açobrita.

Foram traçadas também as curvas de saturação correspondentes as 100% (Sr=100%), 90% (Sr=90%) e 80%(Sr=80%), com valor de G<sub>s</sub>=3,518. O ponto correspondente ao teor de umidade ótima verificado encontra-se entre um grau de saturação de 80% e 90%.

A Tabela 4.22 apresenta os resultados dos ensaios de compactação e de ISC e a Figura 4.14 o gráfico combinado com as curvas de compactação e ISC versus umidade do açobrita.

Tabela 4.22 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC do açobrita.

Corpo de prova	Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
1	22,46	9,14	0,02	51
2	22,52	11,86	0,00	90
3	22,96	13,11	0,00	170
4	22,84	14,08	0,00	120
5	22,68	15,62	0,00	50

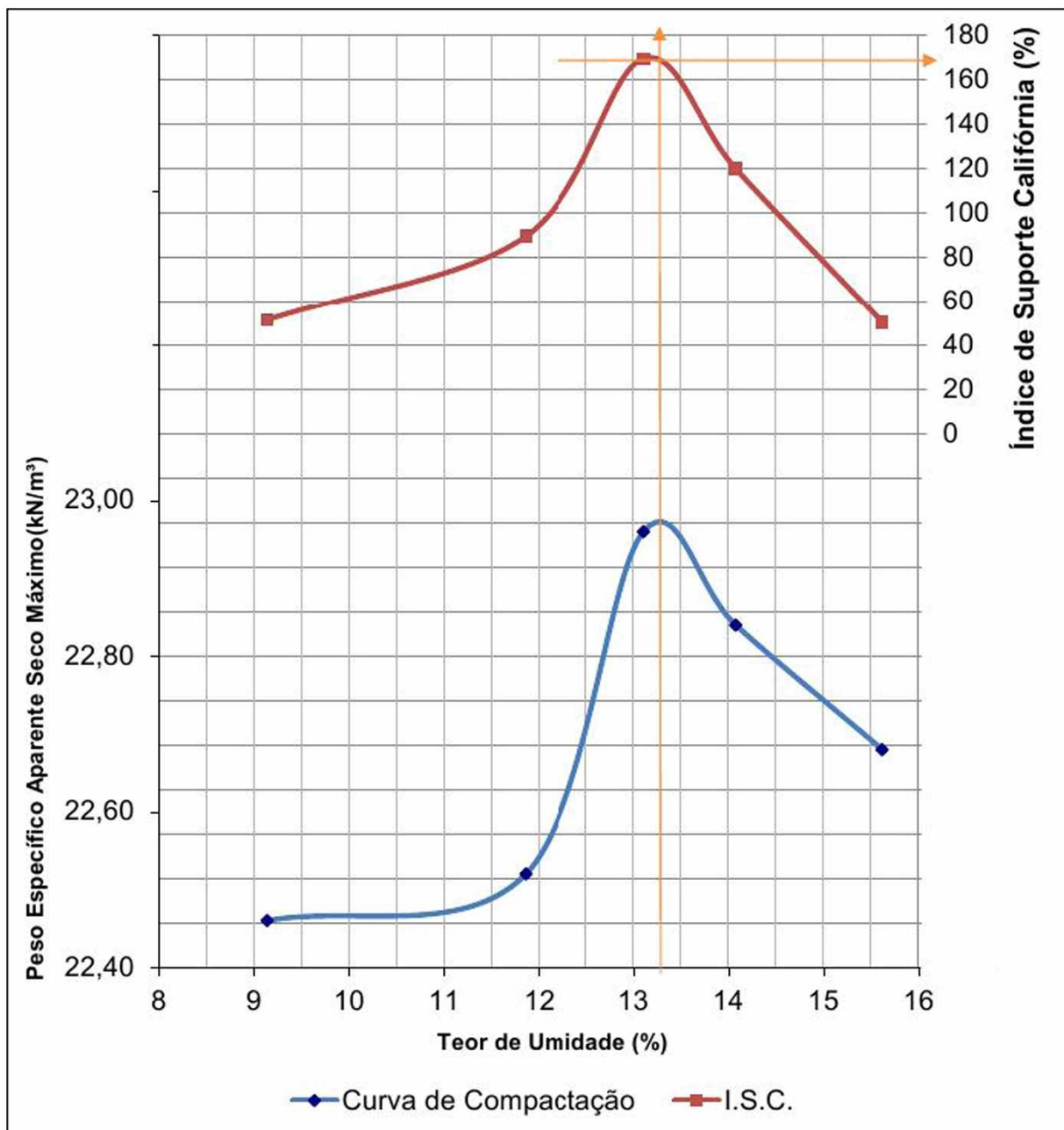


Figura 4.14 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC do açobrita.

Apenas o corpo de prova compactado na umidade 9,14% apresentou expansão, com valor igual a 0,02%, todos os outros corpos de prova apresentaram expansão nula, indicando que o processo de cura ao qual o material foi submetido na usina, antes da sua distribuição ou comercialização, apresenta resultados satisfatórios para o parâmetro. Destaca-se que as normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017) não determinam parâmetros de expansão para o açobrita quando ensaiado pela metodologia da norma ME-172 (DNIT, 2016).

Com o gráfico combinado das curvas de compactação e ISC versus umidade (Figura 4.14) determinou-se o ISC do material a partir da umidade ótima, conforme preceituado na norma. O ISC na umidade ótima foi 169%. Tarazona (2016) obteve um ISC para o açobrita igual a 155%, na umidade ótima. No geral, os valores de ISC encontrados mostraram-se superiores aos apresentados por agregados convencionais.

O resultado obtido satisfaz as características determinadas nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), as quais estabelecem que o açobrita deve possuir ISC superior a 80% e 20% para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, respectivamente.

#### **4.8.2. SOLO**

Na Figura 4.15 é apresentada a curva de compactação obtida para o solo tropical. Determinou-se o valor do peso específico máximo aparente seco igual  $17,13\text{kN/m}^3$  na umidade ótima de compactação igual a 19,6%. A curva apresenta um ponto de máximo peso específico bem definido, característico de curvas de compactação de solos coesivos.

Foram traçadas também as curvas de saturação correspondentes as 100% ( $S_r=100\%$ ), 90% ( $S_r=90\%$ ) e 80% ( $S_r=80\%$ ), com valor de  $G_s=2,797$ . O ponto correspondente ao teor de umidade ótima verificado encontra-se entre um grau de saturação de 80% e 90%, indicando ainda a existência de vazios com presença de ar no material ensaiado após o processo de compactação.

Na Tabela 4.23 são apresentados os resultados dos ensaios de compactação e das fases de imersão e penetração do ensaio para determinação de Índice de Suporte Califórnia das amostras de solo puro.

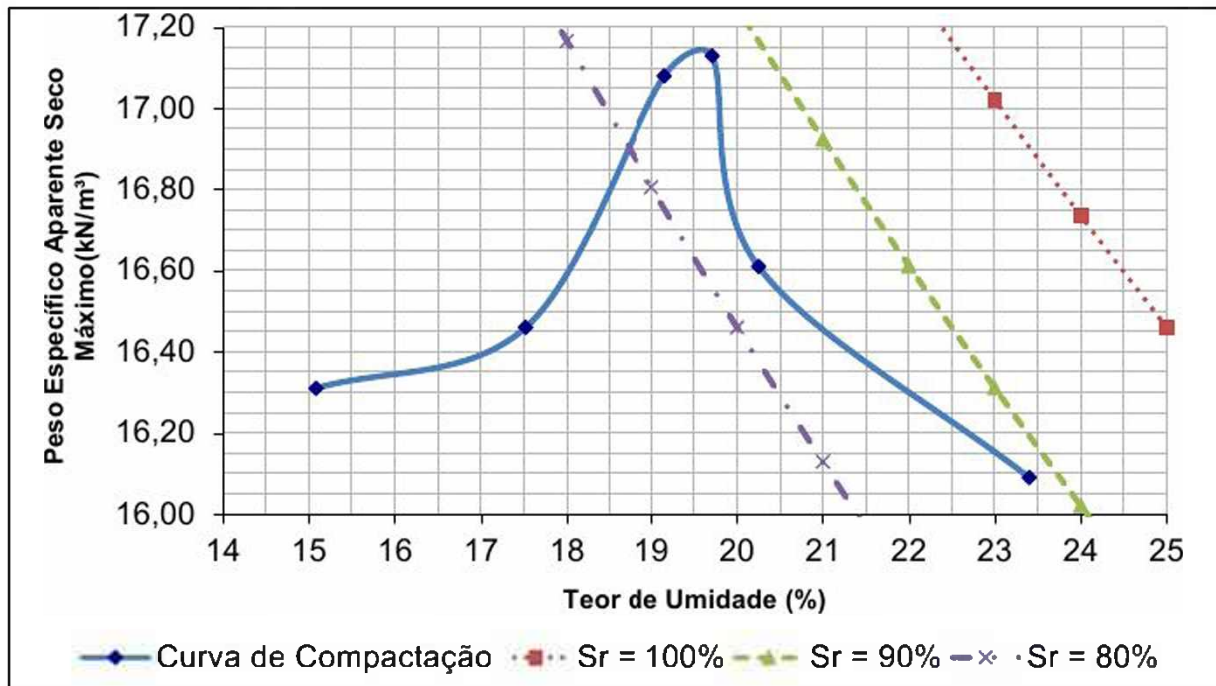


Figura 4.15 – Curva de compactação do solo tropical.

Tabela 4.23 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC do solo tropical.

Corpo de prova	Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
1	16,31	15,08	0,46	26
2	16,46	17,52	0,33	46
3	17,08	19,15	0,28	60
4	17,12	19,71	0,26	57
5	16,61	20,25	0,23	35
6	16,09	23,40	0,21	4

A maior expansão verificada ocorreu no corpo de prova número 1, presente no ramo seco da curva, com umidade igual a 15,08% e expansão igual a 0,46%. Nas normas ES-141 (DNIT, 2010) e ES-139 (DNIT, 2010), estabelecem que os solos devem apresentar expansão menor que ou igual a 0,5% para base e 1,0% para sub-base, quando ensaiados, conforme metodologia ME-172 (DNIT, 2016). Verificou-se, dessa forma, que o solo tropical ensaiado atende os parâmetros de expansão para utilização como constituinte de pavimentos rodoviários.

A Figura 4.16 apresenta o gráfico combinado com as curvas de compactação e ISC versus umidade para o solo. O ISC solo puro na umidade ótima foi 58%. No geral, o valor de ISC encontrado mostrou-se superior ao apresentado por solos tropicais da região. Tarazona (2016) obteve um ISC para o solo tropical de Minas Geras igual a 32,5% na umidade ótima, ensaiado com energia do Proctor Modificado e 26,0% para energia do Proctor Normal.

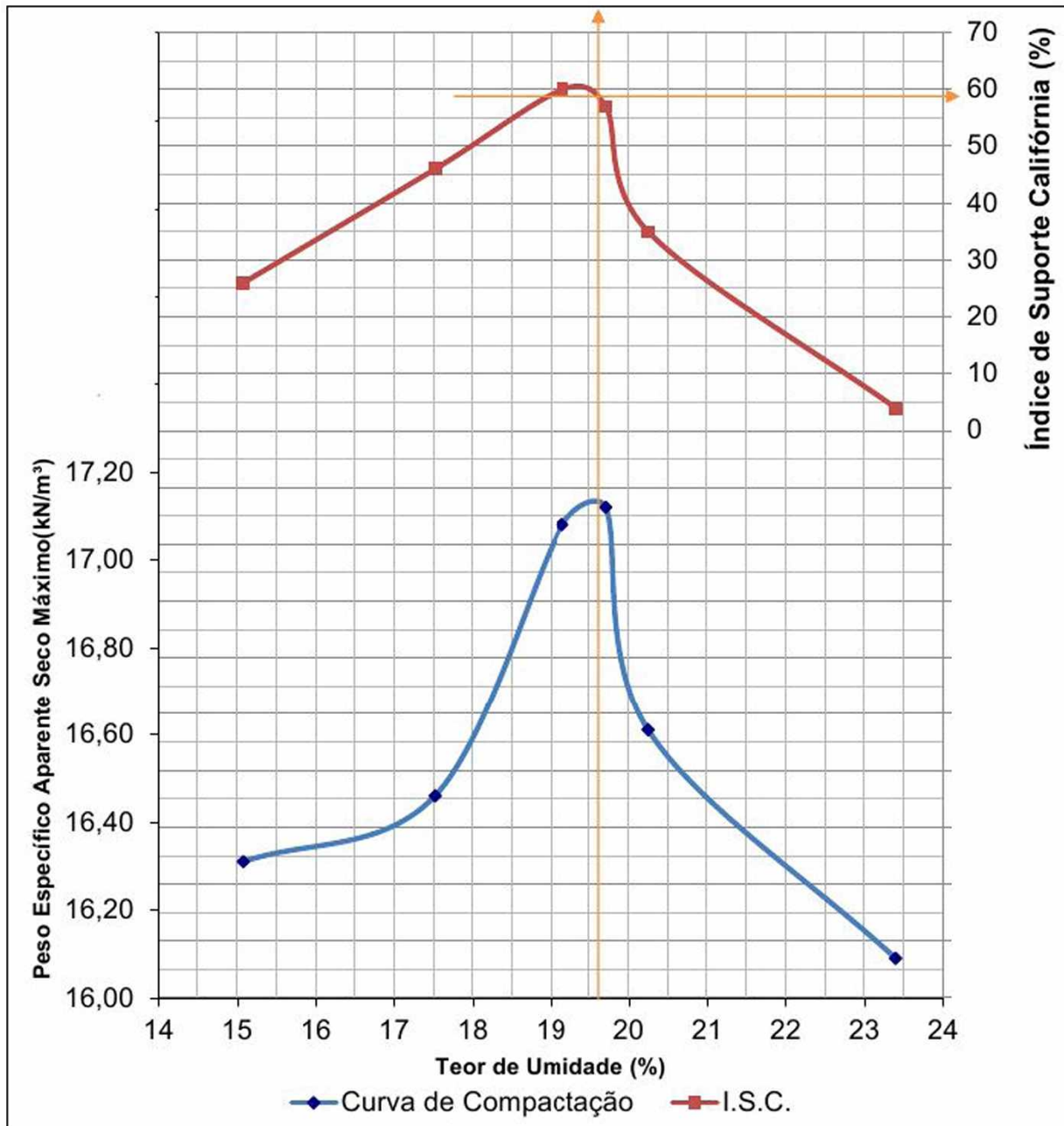


Figura 4.16 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC do solo tropical.

As normas ES-141 (DNIT, 2010) e ES-139 (DNIT, 2010) estabelecem que os solos utilizados para compor camadas de base e sub-base, respectivamente, devem apresentar ISC maior que ou igual a 80% ( $N > 5 \times 10^6$ ) ou 60% ( $N \leq 5 \times 10^6$ ) para base e 20% para sub-base, quando ensaiados conforme metodologia ME-172 (DNIT, 2016). Verificou-se, dessa forma, que o solo tropical ensaiado atende apenas os parâmetros de ISC, para utilização como constituinte de camadas de sub-base de pavimentos rodoviários.

### 4.8.3. MISTURA M4060

A Figura 4.17 apresenta, através da curva de compactação, os resultados do ensaio de compactação realizado na mistura M4060.

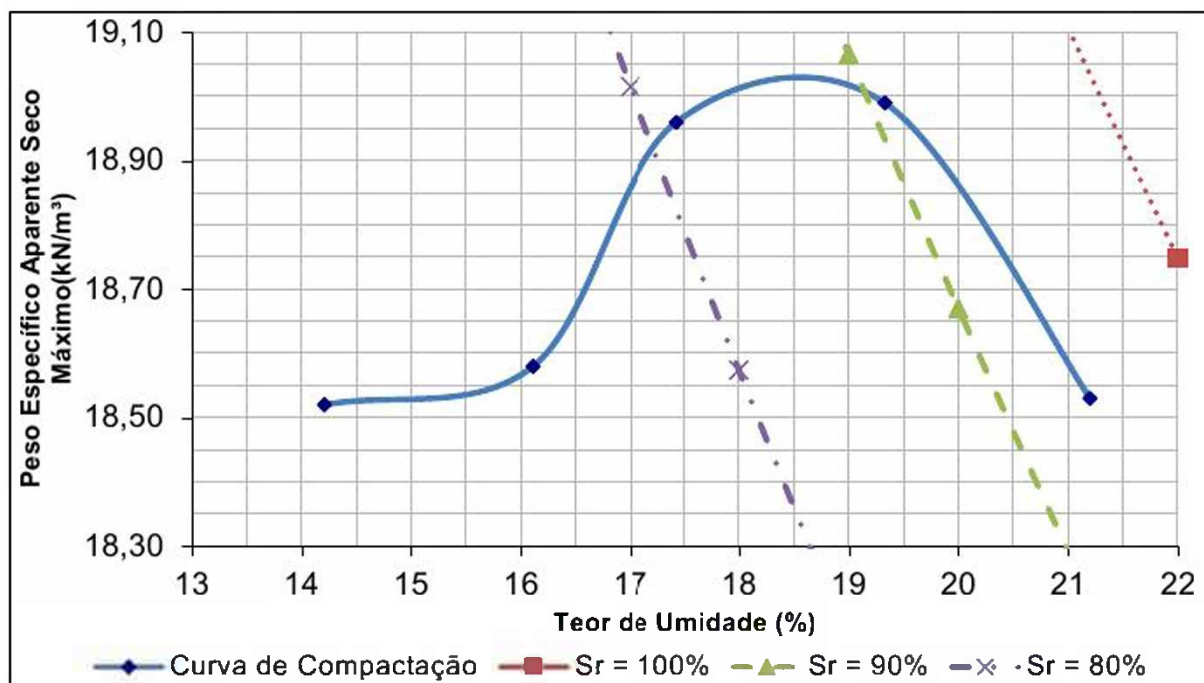


Figura 4.17 – Curva de compactação da mistura M4060.

Determinou-se o valor do peso específico máximo aparente seco igual a  $19,03 \text{ kN/m}^3$  na umidade ótima de compactação igual a 18,6% para a mistura M4060.

Foram traçadas também as curvas de saturação com valor de  $G_s = 3,191$ . O ponto correspondente ao teor de umidade ótima encontra-se entre 80% a 90% do grau de saturação.

A Tabela 4.24 apresenta os resultados dos ensaios de compactação e de ISC e a Figura 4.18 o gráfico combinado com as curvas de compactação e ISC versus umidade da mistura M4060.

Tabela 4.24 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC da mistura M4060.

Corpo de prova	Peso específico aparente seco ( $\text{kN/m}^3$ )	Teor de umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
1	18,52	14,21	0,15	67
2	18,58	16,11	0,11	67
3	18,96	17,43	0,07	146
4	18,99	19,33	0,03	93
5	18,53	21,20	0,02	31

Assim como para o açobrita e solo, a maior expansão verificada ocorreu no corpo de prova número 1, presente no ramo seco da curva, com umidade igual a 14,21% e expansão igual a 0,15%. Os resultados demonstram que mesmo com um percentual maior de solo em relação ao

aço brita, as características de baixa ou nenhuma expansibilidade do aço brita predominam na mistura. As normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), estabelecem que as misturas devem apresentar expansão menor que ou igual a 0,5% para base e 1,0% para sub-base. Verificou-se, desta forma, que a mistura ensaiada atende aos parâmetros de expansão, para utilização como constituinte de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

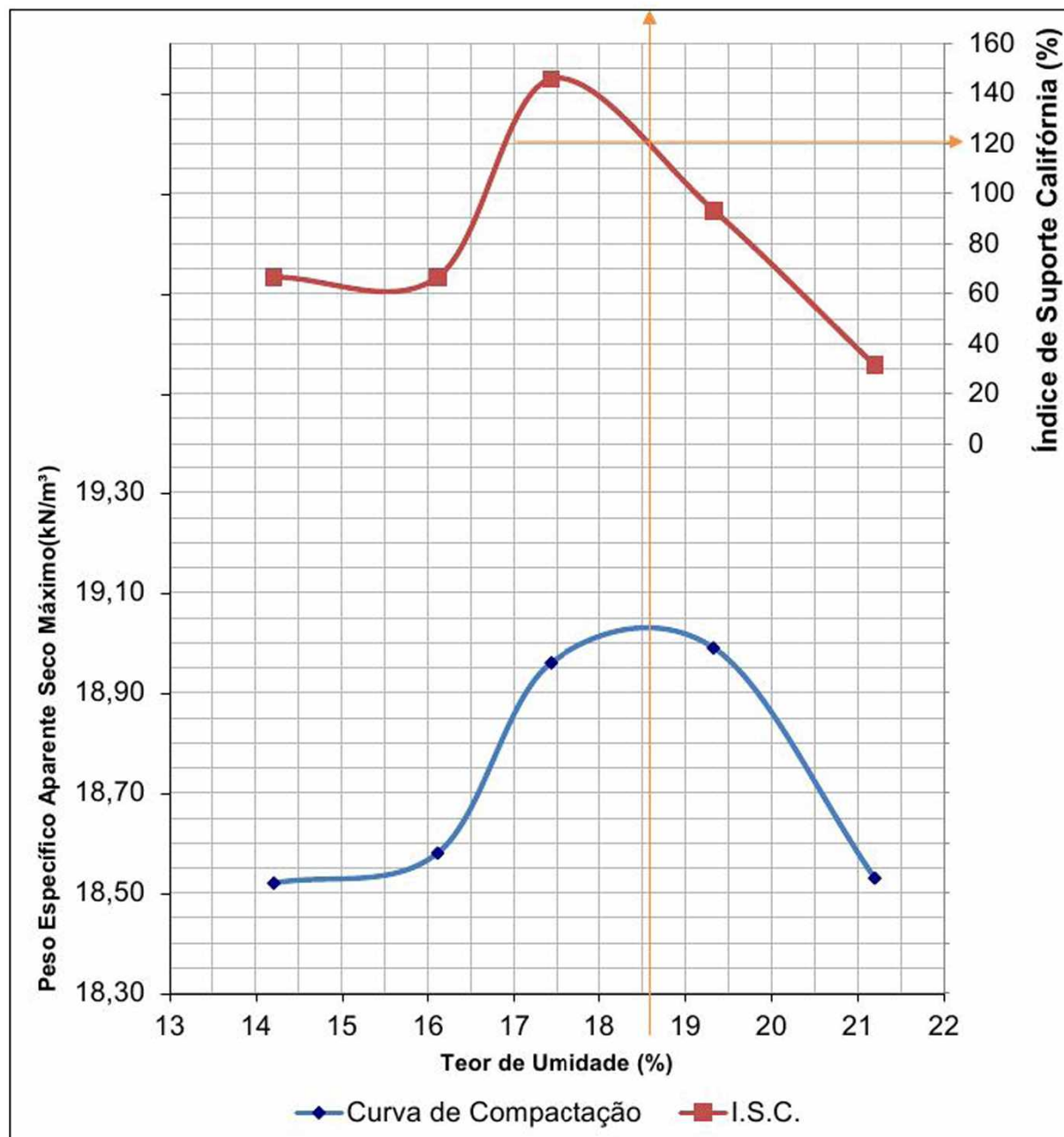


Figura 4.18 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC da mistura M4060.

Determinou-se o ISC da mistura M4060 igual a 120%. Verificou-se que, mesmo com apenas 40% de aço brita na mistura, o valor de ISC determinado é quase 207% maior do que o valor obtido para o solo tropical (58%), demonstrando o excelente desempenho proporcionado pelo aço brita adicionado a mistura.



O resultado obtido satisfaz as características determinadas nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), as quais estabelecem que as misturas de açobrita e solo devem apresentar ISC maior que ou igual a 80% ( $N > 5 \times 10^6$ ) ou 60% ( $N \leq 5 \times 10^6$ ), para base e 20%, para sub-base. Logo, a mistura M4060 atende aos parâmetros de ISC, para utilização como constituinte de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

#### 4.8.4. MISTURA M5050

Na Figura 4.19 são mostrados, por meio da curva de compactação, os resultados do ensaio de compactação realizado na mistura M5050.

Determinou-se o valor do peso específico máximo aparente seco igual a  $19,68 \text{ kN/m}^3$  na umidade ótima de compactação igual a 17,5% para a mistura M5050.

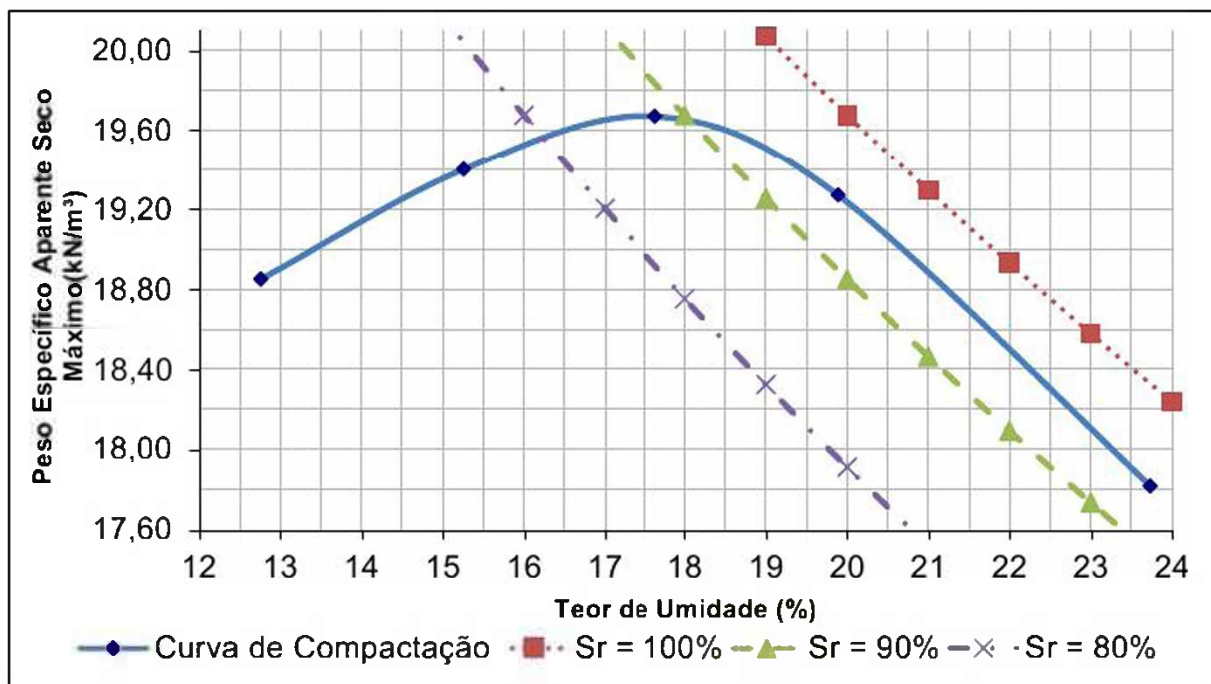


Figura 4.19 – Curva de compactação da mistura M5050.

Foram traçadas também as curvas de saturação com valor de  $G_s=3,244$ . O ponto correspondente ao teor de umidade ótima verificado encontra-se próximo ao grau de saturação igual a 90%.

A Tabela 4.25 apresenta os resultados dos ensaios de compactação e de ISC e a Figura 4.20 o gráfico combinado com as curvas de compactação e ISC versus umidade da mistura M5050.

Tabela 4.25 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC da mistura M5050.

Corpo de prova	Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de umidade (%)	Expansão (%)	ISC (%)
1	18,85	12,76	0,17	91
2	19,40	15,26	0,08	151
3	19,67	17,63	0,03	130
4	19,27	19,89	0,02	24
5	17,82	23,73	0,01	5

A maior expansão verificada foi igual a 0,17%. Assim, a mistura M5050 atende aos parâmetros de expansão, para utilização como constituinte de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, conforme solicitações das normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

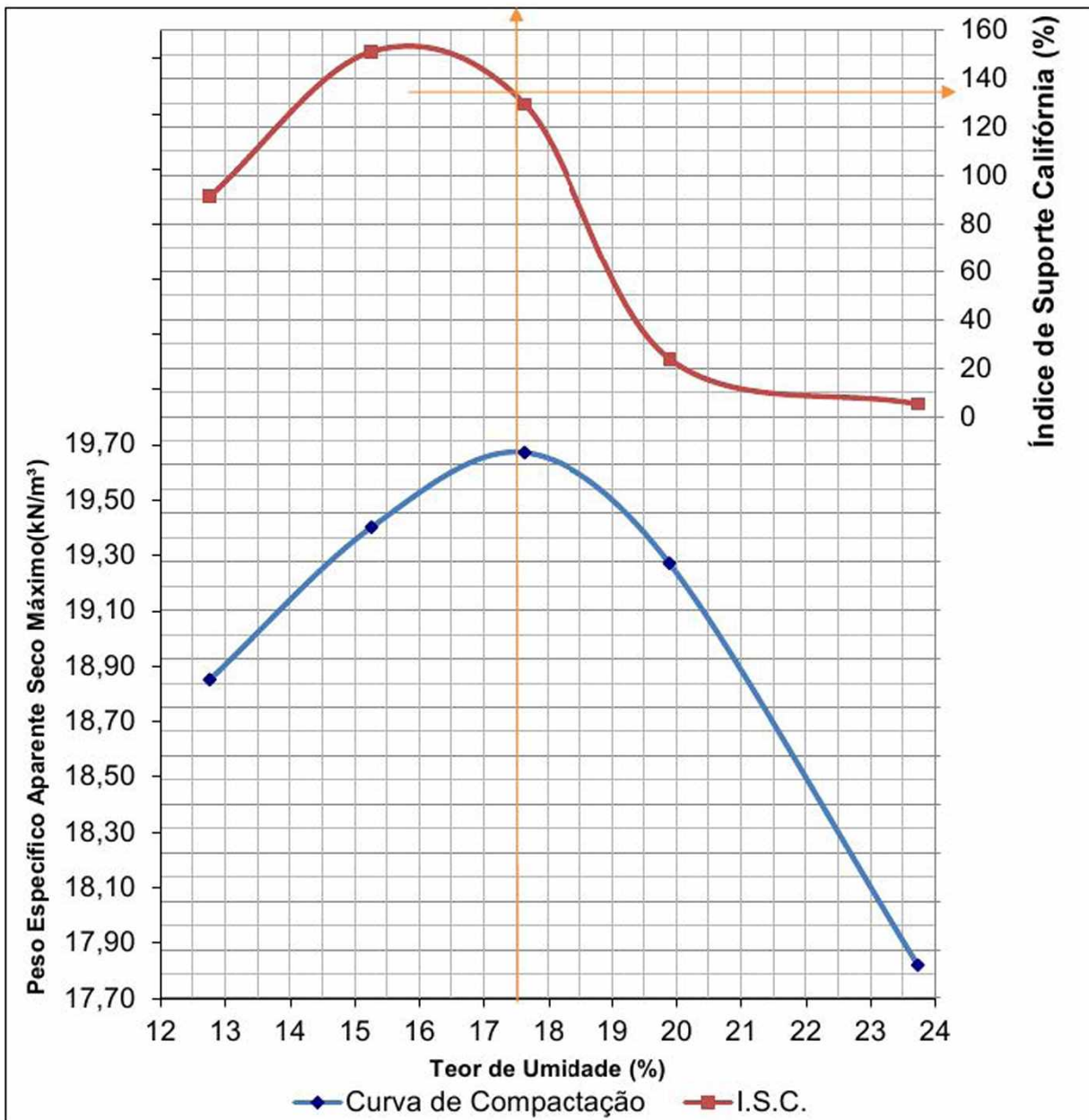


Figura 4.20 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC da mistura M5050.

Determinou-se o ISC da mistura M5050 igual a 134%, sendo este valor mais de 230% do valor obtido para o solo tropical. O resultado de ISC igual a 134% é superior ao solicitado nas normas DNIT ES - 406/2017 e ES - 407/2017, verificou-se, dessa forma, que a mistura M5050 atende aos parâmetros de ISC, para utilização como constituinte de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

#### 4.8.5. MISTURA M6040

A Figura 4.21 apresenta a curva de compactação da mistura M6040.

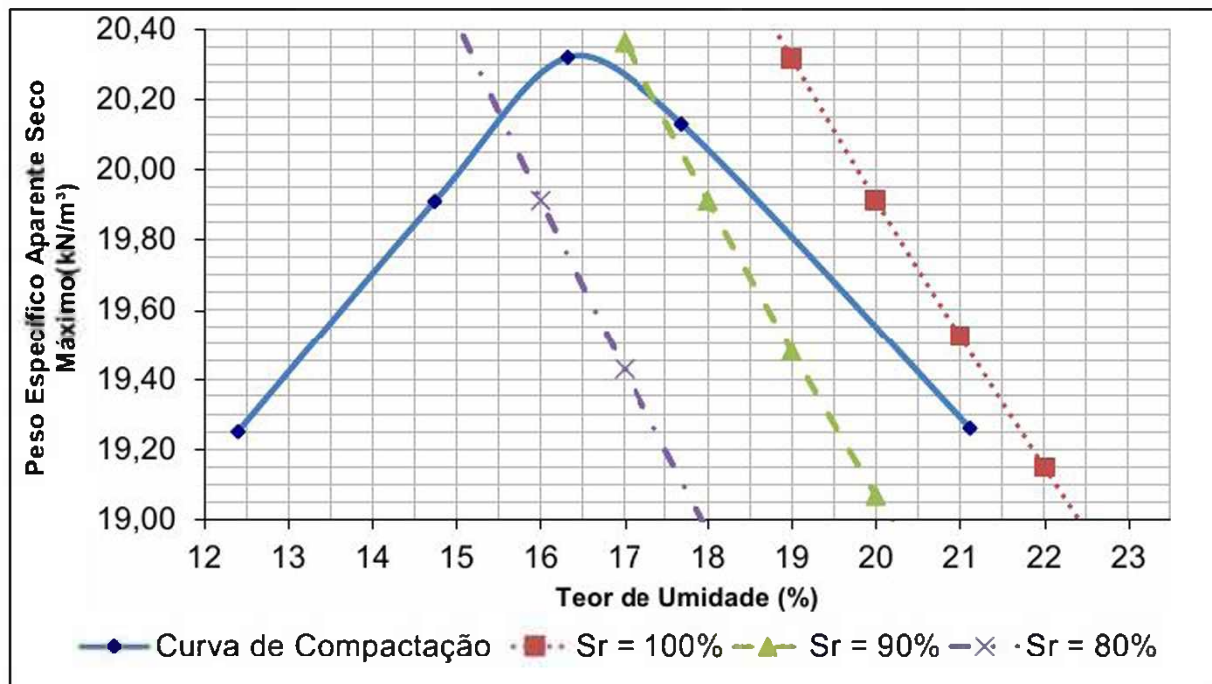


Figura 4.21 – Curva de compactação da mistura M6040.

Determinou-se o valor do peso específico máximo aparente seco igual a 20,33kN/m³ na umidade ótima de compactação igual a 16,4% para a mistura M6040.

Foram traçadas também as curvas de saturação com valor de  $G_s=3,309$ . O ponto correspondente ao teor de umidade ótima verificado encontra-se entre o grau de saturação de 80% e 90%.

A Tabela 4.26 apresenta os resultados dos ensaios de compactação e de ISC e a Figura 4.22 o gráfico combinado com as curvas de compactação e ISC versus umidade da mistura M6040.

A maior expansão verificada foi igual a 0,12%. Observou-se que os corpos de prova compactados no ramo úmido apresentaram expansão nula, seguindo o padrão observado nos ensaios realizados com o açobrita, demonstrando uma coerência entre os resultados, visto que esta mistura possui uma maior quantidade de açobrita em sua composição. Assim, a mistura

M6040 atende aos parâmetros de expansão, para utilização como constituinte de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, conforme solicitações das normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

Tabela 4.26 – Resultados dos ensaios de compactação e ISC da mistura M6040.

CORPO DE PROVA	PESO ESPECIFICO APARENTE SECO (KN/M <sup>3</sup> )	TEOR DE UMIDADE (%)	EXPANSÃO (%)	ISC (%)
1	19,25	12,40	0,12	53
2	19,91	14,74	0,05	118
3	20,32	16,32	0,05	179
4	20,13	17,69	0,00	93
5	18,94	21,12	0,00	6

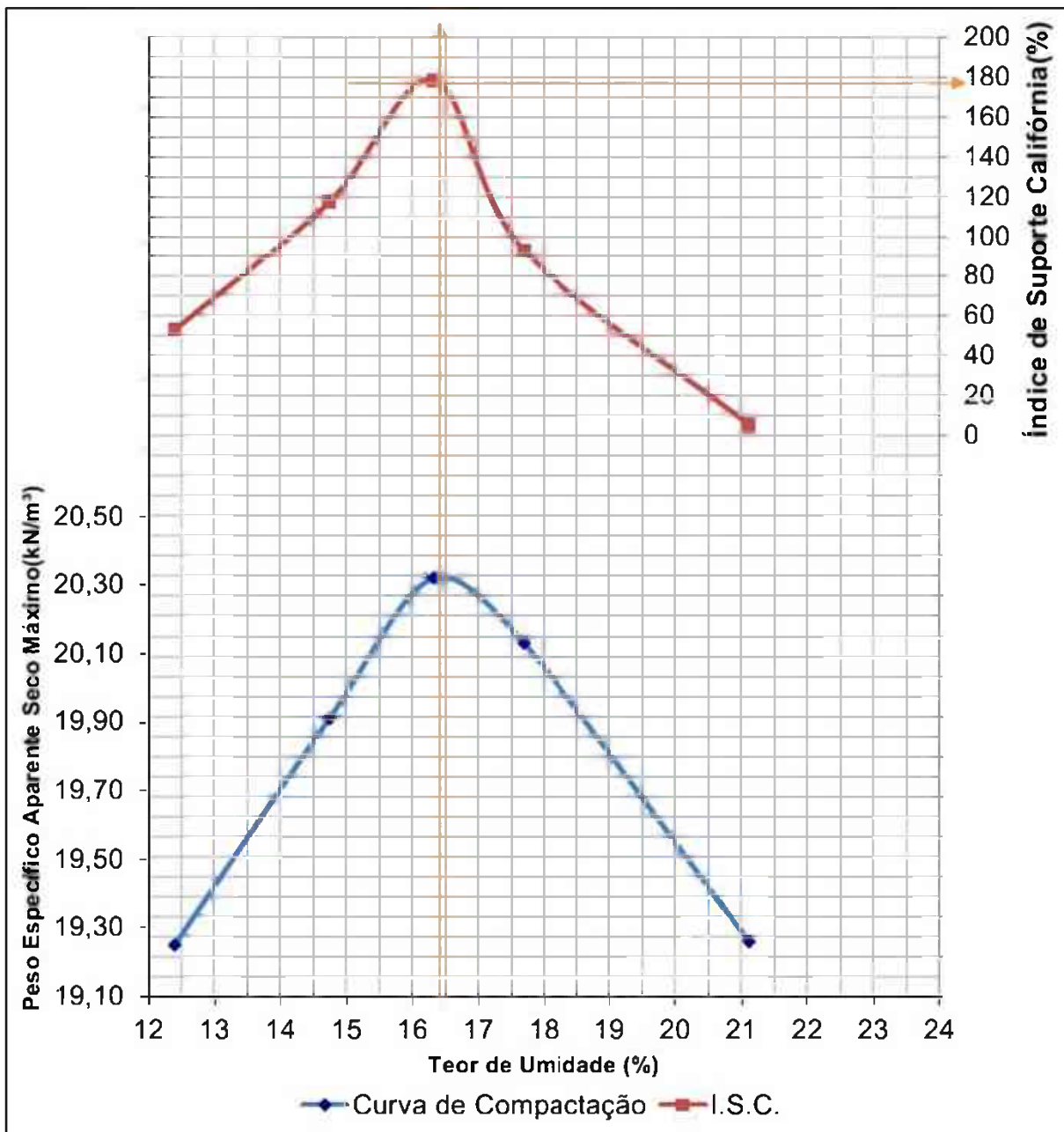


Figura 4.22 – Gráfico combinado das curvas de compactação e ISC da mistura M6040.

Determinou-se o ISC da mistura M6040 igual a 178%. Verificou-se que o valor do ISC é mais de 300% maior do que o valor obtido para o solo tropical e superior ao obtido para a açobrita de 169%, este fato justifica-se pelo preenchimento dos vazios presentes na amostra de açobrita, com as partículas fina do solo, aumentando desta forma a capacidade de suporte da mistura.

O resultado de ISC igual a 178% é superior ao solicitado nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017). Logo, a mistura M6040 atende aos parâmetros de ISC, para utilização como constituinte de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

#### 4.8.6. ANÁLISES COMPARATIVAS

A Tabela 4.27 apresenta um resumo dos ensaios de compactação e ISC e a Figura 4.23 as curvas de compactação resultantes de cada material ensaiado.

Tabela 4.27 – Resumo dos ensaios de compactação e ISC dos materiais.

Material	Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de umidade ótima (%)	Expansão (%)	ISC (%)
Açobrita	22,98	13,3	0,02	169
M6040	20,33	16,4	0,12	178
M5050	19,68	17,5	0,17	134
M4060	19,03	18,6	0,15	120
Solo	17,13	19,6	0,46	58

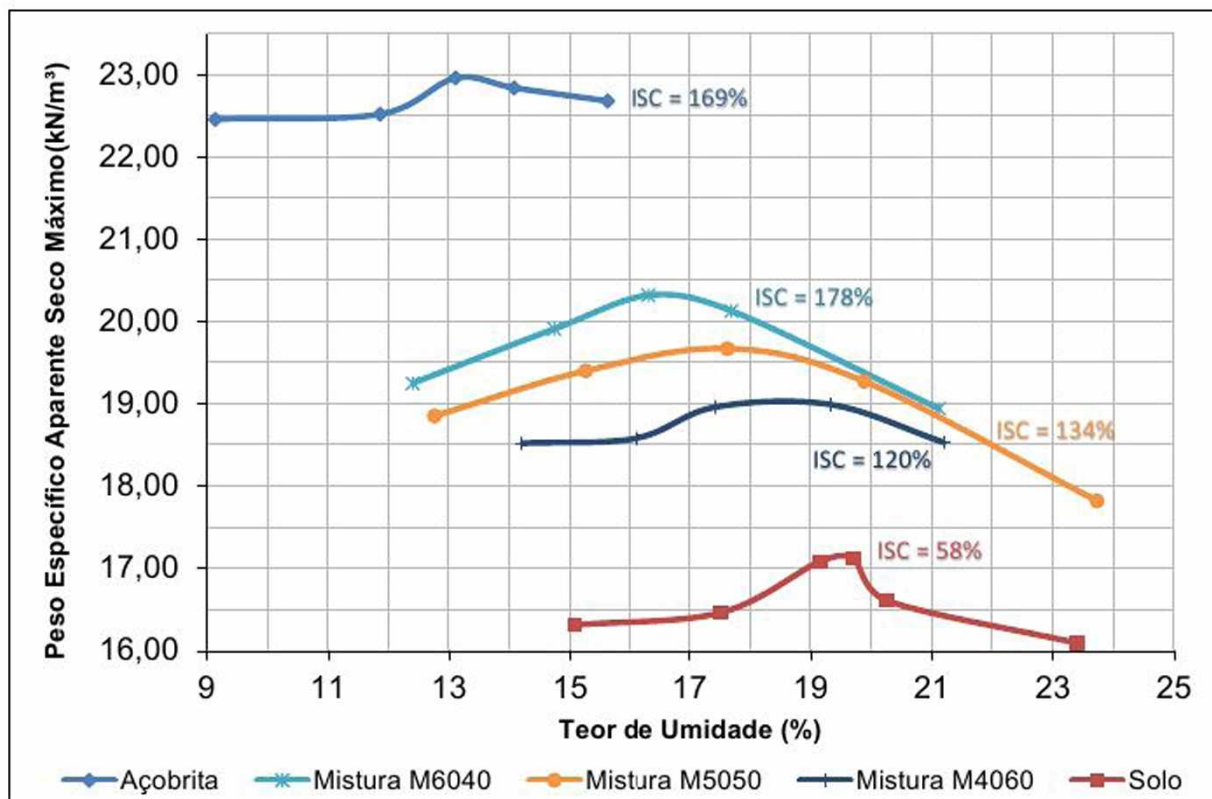


Figura 4.23 – Curvas de compactação dos materiais ensaiados.

Verifica-se que o aumento do teor do açobrita utilizado nas amostras gera um aumento nos valores de pesos específico da aparente seco do material ensaiado e, inversamente, uma diminuição do teor de umidade ótima de compactação. A diferença entre os valores de  $G_s$  do açobrita e do solo puro gera uma tendência de aumento do peso específico aparente com o aumento do percentual de açobrita na amostra ensaiadas. Sendo assim, para verificar a efetividade do processo de compactação foram traçadas as curvas de índice de vazios das amostras ensaiadas em função da umidade ótima. Na Figura 4.24 são apresentadas a curvas de índices de vazios.

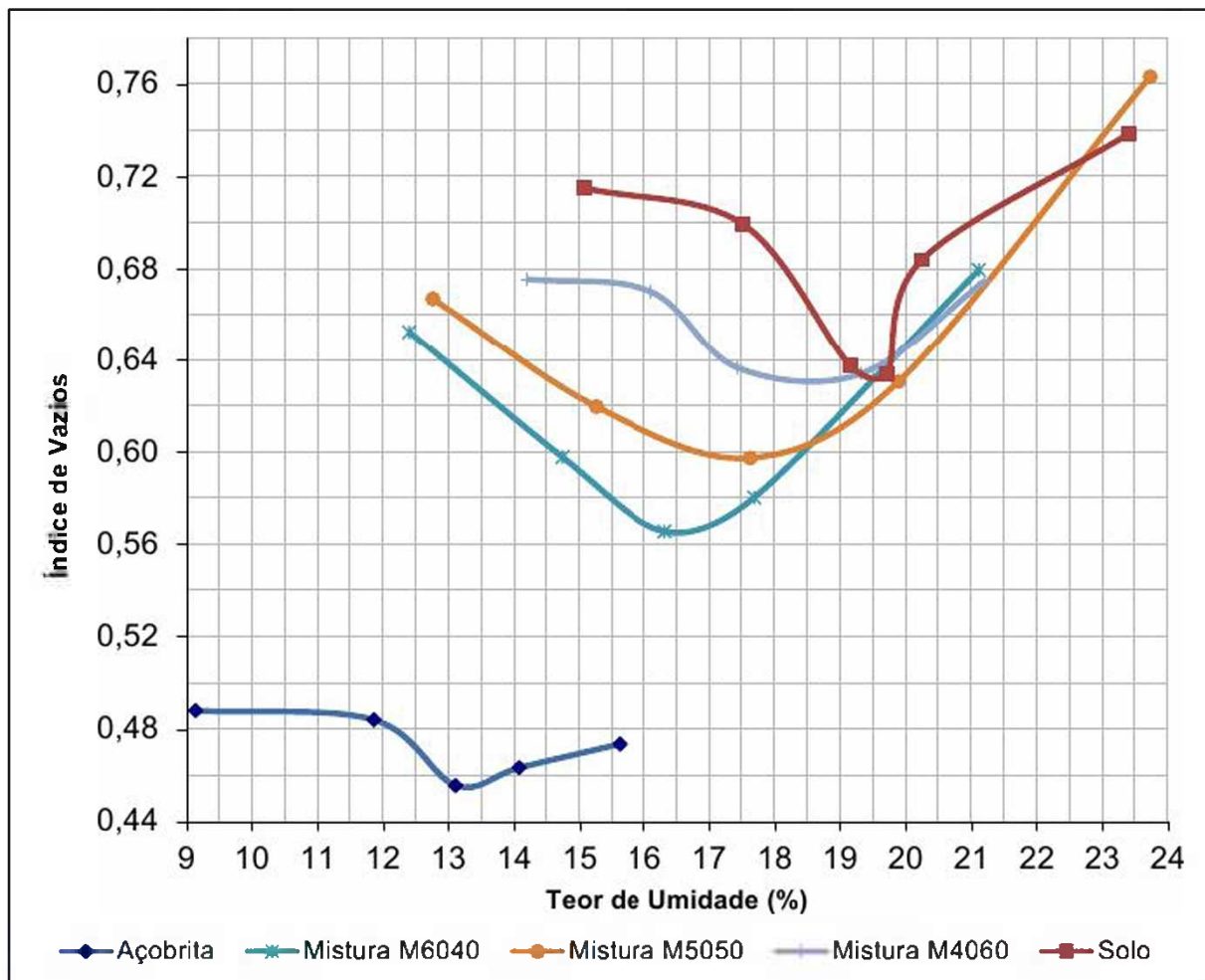


Figura 4.24 – Curvas de índices de vazios das amostras ensaiadas.

Analisando a Figura 4.24, observa-se que os menores valores de índice de vazios foram obtidos nos ensaios do açobrita, demonstrando uma maior eficiência no processo de compactação do material. Verifica-se também um aumento gradual dos índices de vazios com o aumento do teor de solo, corroborando com os valores encontrados para o material e denotando a maior efetividade no processo de compactação e melhora do comportamento mecânico do material com aumento do teor de açobrita na mistura.

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

Para os materiais estudados, isto é, açobrita e misturas foram realizados 3(três) ensaios para avaliação do potencial de expansão, conforme preconiza a norma ME 113 (DNIT, 2009), sendo 1(um) abaixo da umidade ótima, 1(um) na umidade ótima e 1(um) acima da umidade ótima.

##### 4.9.1. AÇOBRYTA

Na Tabela 4.28 são apresentados os resultados dos ensaios para avaliação do potencial de expansão para o açobrita.

Tabela 4.28 – Resultados dos ensaios de expansão do açobrita.

Corpo de prova		1	2	3
Teor de umidade (%)		10,6	13,2	14,5
Dia N°		Leitura do extensômetro (mm)		
IMERSÃO	0	1,000	0,997	1,000
	1	1,022	1,289	1,057
	2	1,167	1,465	1,555
	3	1,308	1,550	1,750
	4	1,530	1,605	1,831
	5	1,720	1,678	1,920
	6	1,960	1,760	2,010
SATURAÇÃO	7	2,255	1,850	2,080
	8	2,440	1,889	2,125
	9	2,550	1,914	2,182
	10	2,690	1,950	2,255
	11	2,770	2,065	2,300
	12	2,848	2,218	2,352
	13	2,919	2,304	2,404
	14	2,968	2,370	2,450

A Tabela 4.29 apresentada as taxas de expansão acumuladas durante o período dos ensaios e o resultado da média de expansão do açobrita ao final do ensaio, igual a 1,390%. Observou-se que o corpo de prova compactado no ramo seco apresentou uma maior expansão, igual a 1,710%, enquanto a amostra no ramo úmido apresentou expansão igual a 1,267%. Já o corpo de prova na umidade ótima apresentou a menor expansão, de 1,194%.

Tarazona (2016) obteve um potencial médio de expansão para o açobrita igual a 0,92%, com resultados de expansão máxima igual a 0,92%, no ramo seco, 0,96%, no ramo úmido e 0,87%, na umidade ótima.

Tabela 4.29 – Taxa de expansão acumulada do açobrita durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).

Corpo de prova		1	2	3
Teor de umidade (%)		10,6	13,2	14,5
Dia N°		Expansão acumulada (%)		
IMERSÃO	0	0,000	0,000	0,000
	1	0,019	0,254	0,050
	2	0,145	0,407	0,485
	3	0,268	0,481	0,656
	4	0,460	0,529	0,726
	5	0,626	0,592	0,804
	6	0,834	0,663	0,883
SATURAÇÃO	7	<b>1,090</b>	<b>0,742</b>	<b>0,944</b>
	8	1,251	0,776	0,983
	9	1,347	0,797	1,033
	10	1,468	0,829	1,097
	11	1,538	0,929	1,136
	12	1,606	1,062	1,182
	13	1,667	1,137	1,227
	14	<b>1,710</b>	<b>1,194</b>	<b>1,267</b>
<b>MÉDIA</b>		<b>1,390</b>		

A Figura 4.25 apresenta as três curvas de expansão acumulada das amostras de açobrita ensaiadas.

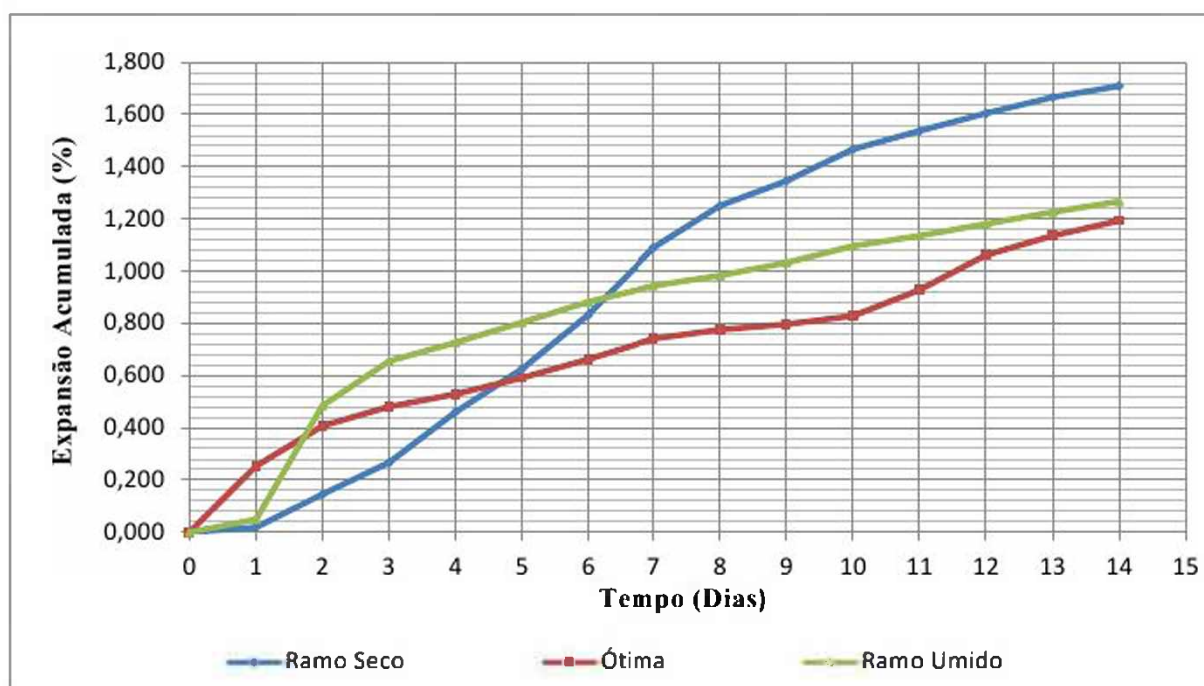


Figura 4.25 – Curva de expansão acumulada do açobrita durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).

Examinando a Figura 4.25 e os dados da Tabela 4.29 nota-se que a amostra compactada no ramo seco praticamente não apresentou expansão nas primeiras 24 horas, logo após, ainda durante a fase submersa (entre o 2º e 7º dia) apresentou a maior taxa de expansão, dentre as três



amostras. Após o 7º dia, durante a fase saturada, verificou-se um menor incremento da taxa de expansão. Ao final do 14º dia observou-se que a amostra apresentou maior potencial de expansão acumulado.

O corpo de prova ensaiado na umidade ótima apresentou a maior taxa de expansão nas primeiras 24 horas, mantendo um incremento constante até o final da fase submersa. Na fase saturada, a partir do 10º dia verificou-se um novo acréscimo da taxa. Ao final do ensaio a amostra apresentou a menor expansão. As amostras ensaiadas no ramo seco e na umidade ótima apresentaram comportamento semelhante ao encontrado por Tarazona (2016).

A amostra ensaiada no ramo úmido, também apresentou uma pequena taxa de expansão nas primeiras 24 horas, crescendo rapidamente no período entre o 1º e o 3º dia e mantendo-se constantes nos demais dias da fase submersa (entre o 4º e 7º dia) e da fase saturada (entre o 8º e 14º dia).

Concluída a fase de saturação do ensaio para avaliação do potencial de expansão, as amostras foram desmoldadas e cuidadosamente desmanchadas, consoante indicado pela norma ME 113 (DNIT,2009). Verificou-se que as amostras não apresentavam formação cristalina na superfície das partículas do açobrita, conforme Figura 4.26. A norma do ensaio não especifica outra metodologia ou parâmetro para realização desta verificação.



Figura 4.26 – Amostra de açobrita após ensaio de avaliação do potencial de expansão.

O resultado obtido satisfaz o limite determinados nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), as quais estabelecem que a média do potencial de expansão de três corpos de prova deve ser inferior a 3%, para utilização do açobrita em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, respectivamente.

#### 4.9.2. MISTURA M4060

Na Tabela 4.30 são apresentados os resultados dos ensaios para avaliação do potencial de expansão da mistura M4060.

Tabela 4.30 – Resultados dos ensaios de expansão da mistura M4060.

Corpo de prova		1	2	3
Teor de umidade (%)		16,5	18,4	20,4
Dia N°		Leitura do extensômetro (mm)		
IMERSÃO	0	1,018	1,007	1,071
	1	1,045	1,037	1,136
	2	1,052	1,060	1,140
	3	1,060	1,145	1,150
	4	1,075	1,270	1,160
	5	1,119	1,485	1,172
	6	1,167	1,591	1,181
SATURAÇÃO	7	1,231	1,658	1,191
	8	1,293	1,685	1,178
	9	1,363	1,727	1,178
	10	1,420	1,737	1,178
	11	1,480	1,753	1,182
	12	1,540	1,770	1,187
	13	1,620	1,787	1,192
	14	1,725	1,802	1,200

A Tabela 4.31 apresenta as taxas de expansão acumuladas durante o período dos ensaios, além do resultado da média de expansão da mistura M4060 ao final do ensaio, igual a 0,473%.

Tabela 4.31 – Taxa de expansão acumulada da mistura M4060 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).

Corpo de prova		1	2	3
Teor de umidade (%)		16,5	18,4	20,4
Dia N°		Expansão acumulada (%)		
IMERSÃO	0	0,000	0,000	0,000
	1	0,023	0,026	0,057
	2	0,030	0,046	0,060
	3	0,036	0,120	0,069
	4	0,050	0,229	0,078
	5	0,088	0,416	0,088
	6	0,129	0,508	0,096
SATURAÇÃO	7	0,185	0,566	0,105
	8	0,239	0,590	0,094
	9	0,300	0,626	0,094
	10	0,349	0,635	0,094
	11	0,401	0,649	0,097
	12	0,454	0,663	0,101
	13	0,523	0,678	0,106
	14	0,614	0,691	0,113
MÉDIA		0,473		

O corpo de prova compactado na umidade ótima apresentou maior expansão, igual a 0,691%, enquanto a amostra no ramo seco apresentou expansão igual a 0,614%. Já o corpo de prova no ramo úmido apresentou a menor expansão, igual a 0,113%.

A Figura 4.27 apresenta as três curvas de expansão acumulada das amostras da mistura M4060.

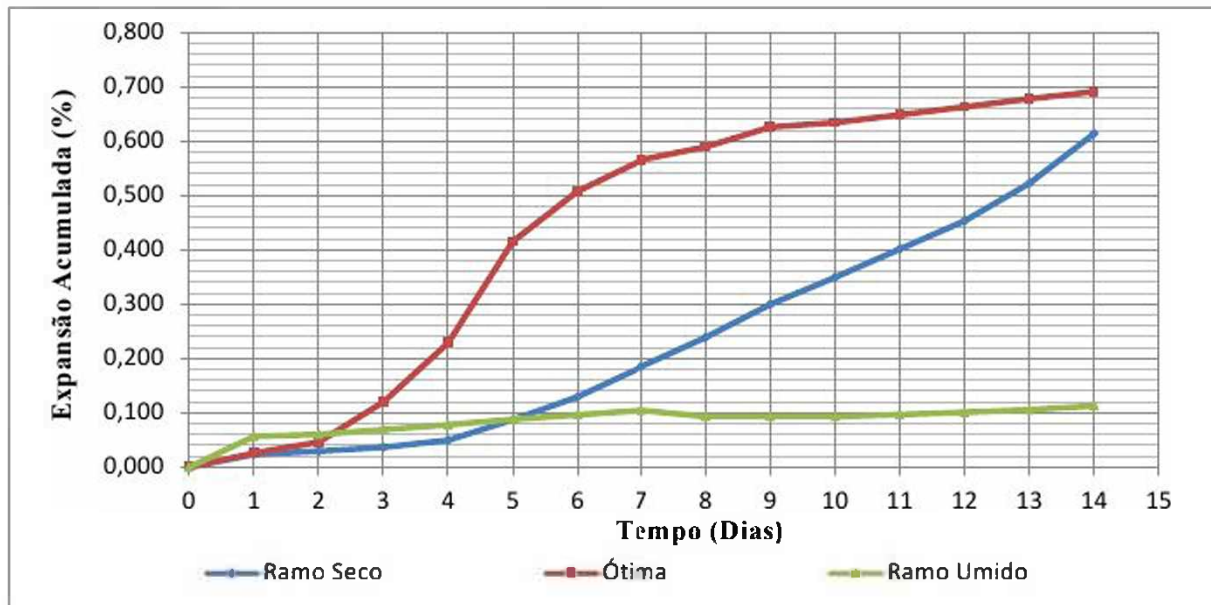


Figura 4.27 – Curva de expansão acumulada da mistura M4060 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).

Examinando a Figura 4.27 e os dados da Tabela 4.31 nota-se que a amostra compactada no ramo seco apresentou a menor expansão nas primeiras 24 horas e a maior incremento após o 4º dia.

O corpo de prova ensaiado na umidade ótima também apresentou uma pequena taxa de expansão nas primeiras 24 horas, seguido por um grande incremento na taxa até o final da fase submersa. Na fase saturada, a partir do 7º dia verificou-se ainda um incremento na taxa, porém com crescimento menor do que o ocorrido na fase saturada. Ao final do ensaio a amostra apresentou a maior expansão acumulada.

A amostra ensaiada no ramo úmido, ao contrário das outras, apresentou a maior taxa de expansão nas primeiras 24 horas, crescendo de forma discreta durante o restante do ensaio, resultando no corpo de prova com menor expansão acumulada.

Concluída a fase de saturação do ensaio, verificou-se que as amostras não apresentavam formação cristalina na superfície das partículas da mistura, conforme Figura 4.28.



Figura 4.28 – Amostra da mistura M4060 após ensaio de avaliação do potencial de expansão.

O resultado obtido satisfaz os limites determinados nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), as quais estabelecem que a média do potencial de expansão de três corpos de prova da mistura deve ser inferior a 1,5% (para um número N inferior ou igual a  $5 \times 10^6$ ) e 1,0% (para um número N maior do que  $5 \times 10^6$ ), quando utilizada em camadas de base e inferior a 1,5%, quando utilizada em camadas de sub-base de pavimentos rodoviários.

#### 4.9.3. MISTURA M5050

Na Tabela 4.32 são apresentados os resultados dos ensaios de expansão da mistura M5050.

Tabela 4.32 – Resultados dos ensaios de expansão da mistura M5050.

<b>Corpo de prova</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Teor de umidade (%)</b>		15,5	17,5	19,3
<b>Dia N°</b>		<b>Leitura do extensômetro (mm)</b>		
<b>IMERSÃO</b>	<b>0</b>	1,000	1,000	1,014
	<b>1</b>	1,009	1,018	1,018
	<b>2</b>	1,040	1,123	1,053
	<b>3</b>	1,072	1,231	1,091
	<b>4</b>	1,120	1,340	1,138
	<b>5</b>	1,242	1,480	1,192
	<b>6</b>	1,380	1,560	1,250
	<b>7</b>	1,480	1,634	1,299
<b>SATURAÇÃO</b>	<b>8</b>	1,506	1,675	1,315
	<b>9</b>	1,575	1,750	1,353
	<b>10</b>	1,630	1,840	1,380
	<b>11</b>	1,688	1,924	1,400
	<b>12</b>	1,710	2,020	1,423
	<b>13</b>	1,738	2,118	1,446
	<b>14</b>	1,761	2,212	1,464

A Tabela 4.33 apresentada as taxas de expansão acumuladas durante o período dos ensaios e o resultado da média de expansão da mistura M5050 ao final do ensaio, igual a 0,703%.

Observou-se que o corpo de prova compactado na umidade ótima apresentou a maior expansão, igual a 1,054%, enquanto a amostra no ramo seco apresentou expansão igual a 0,661%. Já o corpo de prova no ramo úmido apresentou a menor expansão, igual a 0,393%.

Tabela 4.33 – Taxa de expansão acumulada da mistura M5050 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).

Corpo de prova		1	2	3
Teor de umidade (%)		15,5	17,5	19,3
Dia N°		Expansão acumulada (%)		
IMERSÃO	0	0,000	0,000	0,000
	1	0,008	0,016	0,003
	2	0,035	0,107	0,034
	3	0,063	0,201	0,067
	4	0,104	0,296	0,108
	5	0,210	0,417	0,156
	6	0,330	0,487	0,206
SATURAÇÃO	7	0,417	0,551	0,249
	8	0,440	0,587	0,263
	9	0,500	0,652	0,296
	10	0,547	0,730	0,320
	11	0,598	0,803	0,337
	12	0,617	0,887	0,358
	13	0,641	0,972	0,378
	14	0,661	1,054	0,393
MÉDIA		0,703		

A Figura 4.29 apresenta as três curvas de expansão acumulada da mistura M5050. Examinando a Figura 4.29 e os dados da Tabela 4.33 nota-se que a amostra compactada no ramo seco apresentou a menor expansão nas primeiras 24 horas, e um maior incremento após o 4º dia.

O corpo de prova ensaiado na umidade ótima, também apresentou uma pequena taxa de expansão nas primeiras 24 horas, seguido por um grande incremento na taxa até o final da fase saturada. Ao final do ensaio a amostra apresentou a maior expansão acumulada.

A amostra ensaiada no ramo úmido até o 4º dia apresentou comportamento semelhante a amostra ensaiada no ramo seco, seguido com um incremento constante da taxa até o 14º dia, porém menor do que o apresentado pela amostra compactada no ramo seco, resultando no corpo de prova com menor expansão acumulada. No geral, as amostras apresentaram comportamento semelhante ao apresentado pelas amostras da mistura M4060.

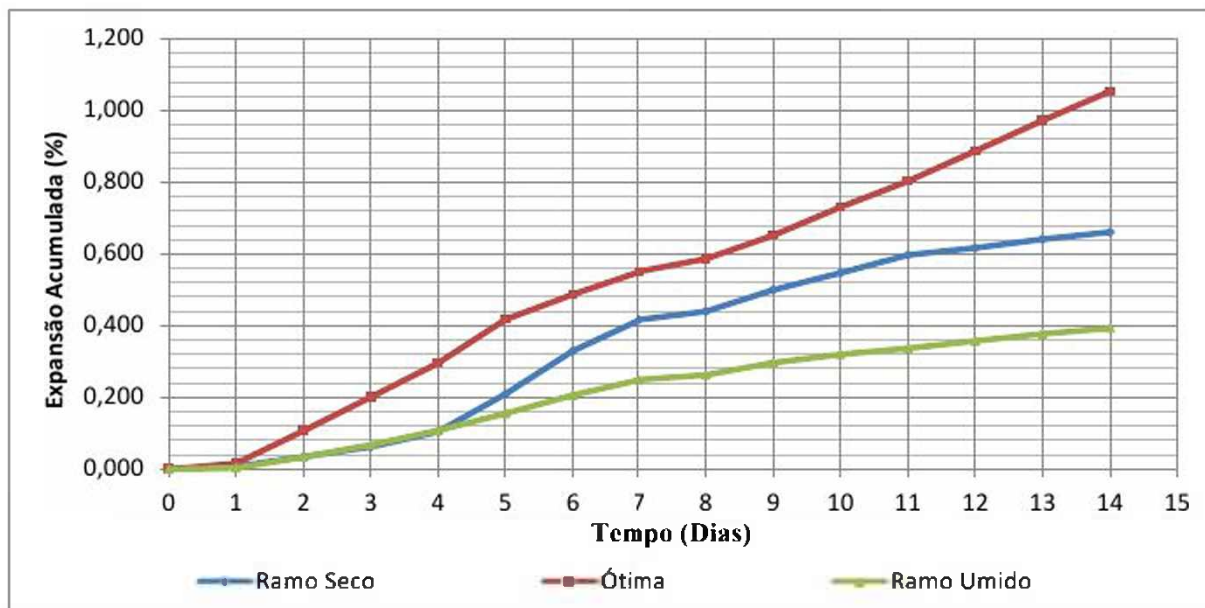


Figura 4.29 – Curva de expansão acumulada da mistura M5050 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).

Concluída a fase de saturação do ensaio verificou-se que as amostras não apresentavam formação cristalina na superfície das partículas da mistura, conforme Figura 4.30.



Figura 4.30 – Amostra da mistura M5050 após ensaio de avaliação do potencial de expansão.

O resultado obtido para mistura M5050 satisfaz os limites determinados nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), estando apta para utilização como constituintes de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

#### 4.9.4. MISTURA M6040

Na Tabela 4.34 são apresentados os resultados dos ensaios de expansão da mistura M6040. A Tabela 4.35 apresentada as taxas de expansão acumuladas e a média de expansão da mistura M6040 ao final do ensaio, igual a 0,400%. Observou-se que o corpo de prova compactado na umidade ótima apresentou maior expansão, igual a 0,555%, enquanto a amostra no ramo seco

apresentou expansão igual a 0,387%. Já o corpo de prova no ramo úmido apresentou a menor expansão, igual a 0,258%.

Tabela 4.34 – Resultados dos ensaios de expansão da mistura M6040.

Corpo de prova		1	2	3
Teor de umidade (%)		13,9	15,9	17,9
Dia N°		Leitura do extensômetro (mm)		
IMERSÃO	0	1,010	1,007	1,005
	1	1,030	1,020	1,009
	2	1,049	1,048	1,037
	3	1,082	1,106	1,062
	4	1,110	1,209	1,081
	5	1,145	1,310	1,099
	6	1,180	1,370	1,113
SATURAÇÃO	7	1,222	1,425	1,125
	8	1,240	1,445	1,127
	9	1,275	1,482	1,152
	10	1,308	1,518	1,190
	11	1,343	1,552	1,234
	12	1,385	1,595	1,268
	13	1,410	1,620	1,283
	14	1,455	1,645	1,300

Tabela 4.35 – Taxa de expansão acumulada da mistura M6040 durante os ensaios ME-113 (DNIT, 2009).

Corpo de prova		1	2	3
Teor de umidade (%)		13,9	15,9	17,9
Dia N°		Expansão acumulada (%)		
IMERSÃO	0	0,000	0,000	0,000
	1	0,017	0,011	0,003
	2	0,034	0,036	0,028
	3	0,063	0,086	0,050
	4	0,087	0,176	0,066
	5	0,117	0,263	0,082
	6	0,148	0,316	0,094
SATURAÇÃO	7	0,184	0,363	0,105
	8	0,200	0,381	0,107
	9	0,230	0,413	0,128
	10	0,259	0,444	0,162
	11	0,289	0,474	0,200
	12	0,326	0,511	0,230
	13	0,348	0,533	0,243
	14	0,387	0,555	0,258
MÉDIA			0,400	

A Figura 4.31 apresenta as três curvas de expansão acumulada das amostras da mistura M6040, examinando-a nota-se que a amostra compactada no ramo seco apresentou a maior expansão nas primeiras 24 horas, logo após, apresentou um incremento na taxa de expansão constante até o 14º dia.

O corpo de prova ensaiado na umidade ótima, também apresentou uma pequena taxa de expansão nas primeiras 24 horas, seguido por um grande incremento na taxa até o final da fase saturada, ao final do ensaio a amostra apresentou a maior taxa de expansão acumulada. Já a amostra ensaiada no ramo úmido praticamente não apresentou variação nas primeiras 24 horas, seguido com um incremento constante da taxa até o 14º dia, resultando no corpo de prova com menor expansão acumulada.

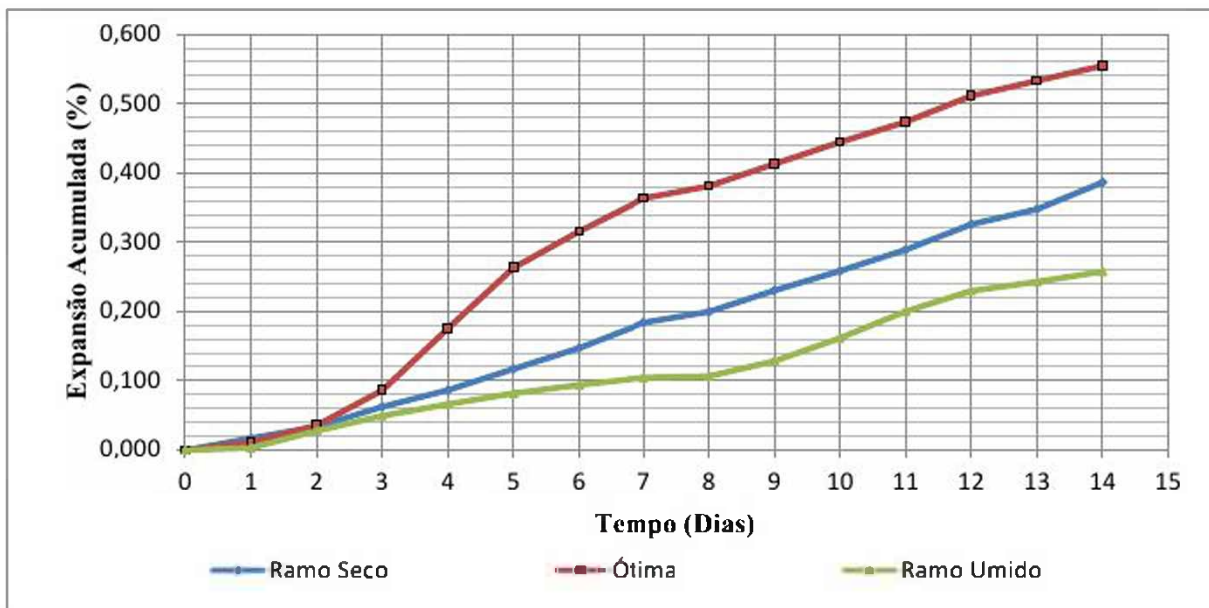


Figura 4.31 – Curva de expansão acumulada da mistura M6040 durante os ensaios ME-113 (DNIT,2009).

Concluída a fase de saturação do ensaio verificou-se que as amostras não apresentavam formação cristalina na superfície das partículas da mistura, conforme Figura 4.32.



Figura 4.32 – Amostra da mistura M6040 após ensaio de avaliação do potencial de expansão.

O resultado obtido para mistura M6040 satisfaz os limites determinados nas normas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), estando apta para utilização como constituintes de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.



#### **4.10. CUSTOS PARA EXECUÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTO COM ESCÓRIA DE ACIARIA**

Em 2017 o DNIT lançou o Sistema de Custos Referencias de Obras (SICRO) com a publicação do Manual de Custos de Infraestrutura de Transporte, onde são apresentadas as metodologias, premissas e memórias adotadas para o cálculo dos custos de referência dos serviços necessários à execução de obras de infraestrutura de transportes e suas estruturas auxiliares.

O SICRO é o sucessor do sistema de custos SICRO 2, possuindo extrema importância para execução de obras de infraestrutura, visto que o sistema deve ser utilizado para definição dos custos de referência de obras de infraestrutura de transportes com recursos da União, conforme Art. 4º do Decreto Presidencial Nº 7.983, de 08 de abril de 2013, o qual estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União.

Um dos grandes avanços do SICRO lançado em 2017 em relação ao seu antecessor é a inclusão de composições de custos para execução de serviços de base e sub-base de solo estabilizado granulometricamente com mistura solo-escória de aciaria.

Para as composições de custos, tanto de sub-base com de base, o sistema de custos prevê misturas de solo e escória de aciaria a proporção, em massa, de 50-50%, com mistura realizadas em usina ou na pista.

Nas Figuras 4.33 e 4.34 são apresentadas as composições de custos do SICRO para os serviços de base ou sub-base estabilizada granulometricamente com mistura de solo e escória de aciaria (50%-50%) com material de jazida em usina e na pista, respectivamente, tendo como referência o estado de Minas Gerais e data base o mês de janeiro de 2018.

As Figuras 4.35 e 4.36 apresentam as composições de custos do SICRO para os serviços de base estabilizada granulometricamente com mistura de solo e brita (70%-30%) com mistura em usina e na pista, respectivamente, novamente tendo como referência o estado de Minas Gerais e data base o mês de janeiro de 2018. Destaca-se que as proporções mencionadas são as únicas proporções de mistura com solo disponibilizadas no sistema de custos SICRO, tanto a relativa a mistura com escória de aciaria, quanto a referente a mistura com brita.

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC 0,02287			
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2018		Produção da equipe			
4011327 Base ou sub-base estabilizada granulometricamente com mistura solo escória de aciaria (50%-50%) em usina com material de jazida				120,70 m <sup>3</sup>			
				Valores em reais (R\$)			
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total	
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo		
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,81	0,39	176,7935	47,9566	126,5483
E9514	Distribuidor de agregados autopropelido - 130 kW	1,00000	0,85	0,15	202,7371	86,4570	186,5951
E9518	Grade de 24 discos rebocável de 24"	1,00000	0,49	0,51	2,8386	1,9732	2,3972
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,69	0,31	142,1559	64,5771	118,1085
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	0,72	0,28	120,8026	53,5972	101,8851
E9577	Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,49	0,51	82,3695	31,5573	56,4553
				<b>Custo horário total dos equipamentos</b>		<b>561,8078</b>	
<b>B - MÃO DE OBRA</b>	Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total		
P9824	Servente	1,00000	h		16,1244		
				<b>Custo horário total de mão de obra</b>		<b>16,1244</b>	
				<b>Custo horário total de execução</b>		<b>607,2119</b>	
				<b>Custo unitário de execução</b>		<b>5,8308</b>	
				<b>Custo do FIC</b>		<b>0,1151</b>	
				<b>Custo do FIT</b>		<b>-</b>	
<b>C - MATERIAL</b>	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário		
				<b>Custo unitário total de material</b>		<b>-</b>	
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário		
6416278	Usinagem de solo escória de aciaria (50% - 50%) com material de jazida em usina de 300 t/h	1,00000	m <sup>3</sup>		16,4700		
				<b>Custo total de atividades auxiliares</b>		<b>16,4700</b>	
				<b>Subtotal</b>		<b>21,6199</b>	
<b>E - TEMPO FIXO</b>	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
6416278	Usinagem de solo escória de aciaria (50% - 50%) com material de jazida em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914652	2,06300	t		1,9200	
				<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>		<b>3,9616</b>	
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>	Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário	
			LN	RP	P		
6416278	Usinagem de solo escória de aciaria (50% - 50%) com material de jazida em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	2,06300	km	5914358	5914374	5914389	
				<b>Custo unitário total de transporte</b>		<b>-</b>	
				<b>Custo unitário direto total</b>		<b>25,58</b>	

Figura 4.33 – Composição de custo unitário para execução de base ou sub-base estabilizada granulometricamente com solo e escória de aciaria (50%-50%) em usina (DNIT).

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC 0,02287			
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2018		Produção da equipe			
4011325 Base ou sub-base estabilizada granulometricamente com mistura solo escória de aciaria (50%-50%) na pista com material de jazida				146,23 m <sup>3</sup>			
				Valores em reais (R\$)			
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total	
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo		
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,81	0,19	176,7935	47,9598	152,3151
E9518	Grade de 24 discos rebocável de 24"	1,00000	0,60	0,40	2,8386	1,9732	2,4924
E9524	Motoveladora - 90 kW	1,00000	1,00	0,00	177,4458	77,1136	177,4458
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,63	0,37	142,1559	64,5771	113,4517
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	0,87	0,13	120,8026	53,5972	112,0659
E9577	Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,60	0,40	82,3695	31,5573	62,0446
				<b>Custo horário total dos equipamentos</b>		<b>619,8155</b>	
<b>B - MÃO DE OBRA</b>	Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total		
P9824	Servente	1,00000	h		16,1244		
				<b>Custo horário total de mão de obra</b>		<b>16,1244</b>	
				<b>Custo horário total de execução</b>		<b>635,9399</b>	
				<b>Custo unitário de execução</b>		<b>4,3489</b>	
				<b>Custo do FIC</b>		<b>0,0995</b>	
				<b>Custo do FIT</b>		<b>-</b>	
<b>C - MATERIAL</b>	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário		
M0194	Escória de aciaria	0,88750	m <sup>3</sup>		12,3257		
				<b>Custo unitário total de material</b>		<b>8,4739</b>	
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário		
4816098	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	0,55013	m <sup>3</sup>		0,8890		
				<b>Custo total de atividades auxiliares</b>		<b>0,4896</b>	
				<b>Subtotal</b>		<b>13,4119</b>	
<b>E - TEMPO FIXO</b>	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
M0194	Escória de aciaria - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5915407	1,03125	t		1,7100	
4816098	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914354	1,03149	t		1,3300	
				<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>		<b>3,1353</b>	
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>	Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário	
			LN	RP	P		
M0194	Escória de aciaria - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	1,03125	km	5914358	5914374	5914389	
4816098	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	1,03149	km	5914358	5914374	5914389	
				<b>Custo unitário total de transporte</b>		<b>-</b>	
				<b>Custo unitário direto total</b>		<b>18,55</b>	

Figura 4.34 – Composição de custo unitário para execução de base ou sub-base estabilizada granulometricamente com solo e escória de aciaria (50%-50%) na pista (DNIT).

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC 0,02287		120,70 m <sup>2</sup>	
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2018		Produção da equipe		Valores em reais (R\$)	
4011268 Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (70% - 30%) em usina com material de jazida e brita comercial							
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo
			Operativa	Improdutiva	Produtiva	Improdutiva	Horário Total
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10 000 l - 188 kW	1,00000	0,36	0,64	176,7935	47,9696	94,3398
E9514	Distribuidor de agregados autopropelido - 130 kW	1,00000	0,85	0,15	202,7371	88,4570	185,5951
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,69	0,31	142,1559	64,5771	118,1065
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	0,72	0,28	120,8026	53,5972	101,9851
						Custo horário total de equipamentos	500,0285
<b>B - MÃO DE OBRA</b>		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total	
P9824	Servente	1,00000	h	16,1244		16,1244	
						Custo horário total de mão de obra	16,1244
						Custo horário total de execução	516,1599
						Custo unitário de execução	4,2763
						Custo do FIC	0,0978
						Custo do FIT	-
<b>C - MATERIAL</b>		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
						Custo unitário total de material	-
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
6416030	Usinagem de solo brita (70% - 30%) com material de jazida e brita comercial em usina de 300 t/h	1,00000	m <sup>2</sup>	34,6900		34,6900	
						Custo total de atividades auxiliares	34,6900
						Subtotal	39,2641
<b>E - TEMPO FIXO</b>		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário
6416030	Usinagem de solo brita (70% - 30%) com material de jazida e brita comercial em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914652	2,06300	l	1,9200		3,9810
						Custo unitário total de tempo fixo	3,9810
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>		Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário
				LN	RP	P	
6416030	Usinagem de solo brita (70% - 30%) com material de jazida e brita comercial em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	2,06300	t/m	5914359	5914374	5914389	
						Custo unitário total de transporte	
						Custo unitário direto total	43,23

Figura 4.35 – Composição de custo unitário para execução de base estabilizada granulometricamente com solo e brita (70%-30%) em usina (DNIT).

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC 0,02287		146,23 m <sup>2</sup>	
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2018		Produção da equipe		Valores em reais (R\$)	
4011256 Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (70% - 30%) na pista com material de jazida e brita comercial							
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo
			Operativa	Improdutiva	Produtiva	Improdutiva	Horário Total
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10 000 l - 188 kW	1,00000	0,21	0,19	176,7935	47,9696	152,3151
E6518	Grada de 24 discos rebocável de 24"	1,00000	0,60	0,40	2,8386	1,9732	2,4024
E9524	Motoniveladora - 93 kW	1,00000	1,00	0,00	177,4458	77,1136	177,4458
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,23	0,17	142,1559	64,5771	128,9875
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	0,37	0,13	120,8026	53,5972	112,0659
E9577	Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,60	0,40	82,3695	31,5573	62,0448
						Custo horário total de equipamentos	635,3313
<b>B - MÃO DE OBRA</b>		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total	
P9824	Servente	1,00000	h	16,1244		16,1244	
						Custo horário total de mão de obra	16,1244
						Custo horário total de execução	651,4557
						Custo unitário de execução	4,4598
						Custo do FIC	0,1818
						Custo do FIT	-
<b>C - MATERIAL</b>		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
M0191	Brita 1	0,41260	m <sup>2</sup>	66,2900		27,3513	
						Custo unitário total de material	27,3513
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
4816096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	0,77019	m <sup>2</sup>	0,8900		0,6855	
						Custo total de atividades auxiliares	0,6855
						Subtotal	32,3937
<b>E - TEMPO FIXO</b>		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914647	0,61890	l	0,6600		0,8127
4816096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914354	1,44411	t	1,3300		1,9207
						Custo unitário total de tempo fixo	2,5334
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>		Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário
				LN	RP	P	
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	0,61890	t/m	5914359	5914374	5914389	
4816096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	1,44411	t/m	5914359	5914374	5914389	
						Custo unitário total de transporte	
						Custo unitário direto total	35,13

Figura 4.36 – Composição de custo unitário para execução de base estabilizada granulometricamente com solo e brita (70%-30%) na pista (DNIT).

Analisando os valores disponibilizados pelo DNIT referente aos serviços de execução de base, utilizando o agregado siderúrgico e o agregado convencional, a brita, verifica-se que o custo de execução do serviço com o agregado siderúrgico, R\$ 25,58/m<sup>3</sup>, corresponde a aproximadamente 60% dos custos com agregado convencional, R\$ 43,23/m<sup>3</sup>, se a mistura for realizada em usina e 47% se realizada na pista, sendo R\$ 16,55/m<sup>3</sup> para o agregado siderúrgico e R\$ 35,13/m<sup>3</sup> para o convencional. Ressalta-se que a composição com mistura de solo e brita apresenta uma porcentagem de apenas 30% do agregado, enquanto a composição referente à mistura com agregado siderúrgico apresenta uma porcentagem de 50% para o agregado, desta forma, a real diferença entre os custos de execução torna-se ainda maior.

Com a finalidade de realizar análise comparativa dos custos entre os serviços para execução de base utilizando misturas de solo com agregado siderúrgico e com agregado convencional, ambas na proporção 50%-50% executada em usina, são apresentadas nas Figuras 4.37 e 4.38, respectivamente, a composição de custo auxiliar para usinagem solo brita (50%-50%) com material de jazida e brita comercial em usina de 300t/h e a composição de custo para execução de base estabilizada granulometricamente com mistura de solo e brita (50%-50%) com material de jazida e mistura realizada em usina.

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		Produção da equipe		120,70 m <sup>3</sup>	
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2018				Valores em reais (R\$)	
Usinagem de solo brita (50% - 50%) com material de jazida e brita comercial em usina de 300 t/h							
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>							
	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo	
		Operativa	Improdutiva	Produtiva	Improdutiva	Horário Total	
E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,3 m <sup>3</sup> - 213 kW	1,00000	0,68	0,32	319,6269	123,5108	256,8697
E9779	Grupo gerador - 100/110 kVA	1,00000	1,00	0,00	55,4271	5,5391	55,4271
E9615	Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h	1,00000	1,00	0,00	128,2156	87,3370	128,2156
<b>Custo horário total de equipamentos</b>						<b>440,5124</b>	
<b>B - MÃO DE OBRA</b>							
	Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total		
P9824	Servente	5,00000	h		16,1244		80,6220
<b>Custo horário total de mão de obra</b>						<b>80,6220</b>	
<b>Custo horário total de execução</b>						<b>521,1344</b>	
<b>Custo unitário de execução</b>						<b>4,3176</b>	
<b>Custo do FIC</b>						<b>0,0978</b>	
<b>Custo do FIT</b>						<b>-</b>	
<b>C - MATERIAL</b>							
	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário		
M0191	Brita 1	0,68767	m <sup>3</sup>		66,2900		45,5856
<b>Custo unitário total de material</b>						<b>45,5856</b>	
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>							
	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário		
4816096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	0,55013	m <sup>3</sup>		0,8800		0,4896
<b>Custo total de atividades auxiliares</b>						<b>0,4896</b>	
<b>Subtotal</b>							<b>50,4907</b>
<b>E - TEMPO FIXO</b>							
	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914647	1,03151	t		0,9900	1,0212
4816096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914354	1,03150	t		1,3300	1,3719
<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>						<b>2,3931</b>	
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>							
	Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário	
			LN	RP	P		
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	0,61890	tkm	5914359	5914374	5914389	
4816096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	1,44411	tkm	5914359	5914374	5914389	
<b>Custo unitário total de transporte</b>						<b>52,88</b>	
<b>Custo unitário direto total</b>						<b>52,88</b>	

Figura 4.37 – Composição de custo auxiliar para usinagem de solo e brita (50%-50%) com material de jazida e brita em usina de 300t/h.

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC			
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2018		Produção da equipe 120,70 m <sup>3</sup>			
Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (50% - 50%) em usina com material de jazida e brita comercial				Valores em reais (R\$)			
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>		Quantidade	Utilização		Custo Horário	Custo	
			Operativa	Improdutiva	Produtiva	Improdutiva	
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10 000 l - 188 kW	1,00000	0,36	0,84	176,7935	47,9598	
E9514	Distribuidor de agregados autopropelido - 130 kW	1,00000	0,85	0,15	202,7371	88,4570	
E9782	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,69	0,31	142,1559	64,5771	
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11.6 t - 82 kW	1,00000	0,72	0,28	120,8028	53,5972	
					Custo horário total de equipamentos	500,0264	
<b>B - MÃO DE OBRA</b>		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total	
P9824	Servente	1,00000	h	16,1244		16,1244	
					Custo horário total de mão de obra	16,1244	
					Custo horário total de execução	516,1508	
					Custo unitário de execução	4,2783	
					Custo do FIC	0,1151	
					Custo do FIT	=	
<b>C - MATERIAL</b>		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
					Custo unitário total de material	=	
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
8416030	Usinagem de solo brita (50% - 50%) com material de jazida e brita comercial em usina de 300 9h	1,00000	m <sup>3</sup>	52,8837		52,8837	
					Custo total de atividades auxiliares	52,8837	
					Subtotal	57,2762	
<b>E - TEMPO FIXO</b>		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
8416030	Usinagem de solo brita (50% - 50%) com material de jazida e brita comercial em usina de 300 9h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914652	2,06300	t	1,9200	3,9610	
					Custo unitário total de tempo fixo	3,9610	
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>		Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário
				LN	RP	P	
8416030	Usinagem de solo brita (70% - 30%) com material de jazida e brita comercial em usina de 300 9h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	2,06300	km	5914359	5914374	5914389	
					Custo unitário total de transporte		
					Custo unitário direto total	61,24	

Figura 4.38 – Composição de custo unitário para execução de base estabilizada granulometricamente com solo e brita (50%-50%) em usina.

A partir dos valores calculados, conforme Figuras 4.37 e 4.38, verifica-se que utilizando a metodologia de custos adotada pelo DNIT, o custo para execução de base com mistura de solo e agregado siderúrgico, na proporção 50%-50%, corresponde a aproximadamente 42% do custo para execução de base com mistura de solo e agregado convencional com a mesma proporção, sendo R\$ 25,58/m<sup>3</sup> (Figura 4.33) para mistura com agregado siderúrgico e R\$ 61,24/m<sup>3</sup> (Figura 4.38) para o agregado convencional.

Na Figura 4.39 é apresentada composição de custos calculada para execução de base estabilizada granulometricamente com mistura de solo e brita, na proporção 50%-50%, com a mistura realizada na pista.

Se a metodologia executiva a ser adotada é a mistura na pista, o custo calculado para execução de base com mistura de solo e agregado convencional, na proporção 50%-50%, é de R\$ 53,02/m<sup>3</sup> (Figura 4.39). O valor calculado demonstra uma vantagem financeira ainda maior da utilização do agregado siderúrgico na mistura, que no caso em análise, apresentou custo de R\$ 16,55/m<sup>3</sup> (Figura 4.34), representa apenas aproximadamente 31% do custo da mistura com agregado convencional.

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC		Produção da equipe	
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2018				148,23 m <sup>3</sup>	
Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (50% - 50%) na pista com material de jazida e brita comercial						Valores em reais (R\$)	
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Utilização</b>		<b>Custo Horário</b>		<b>Custo Horário Total</b>	
		<i>Operativa</i>	<i>Improdutiva</i>	<i>Produtivo</i>	<i>Improdutivo</i>		
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,81	0,19	176,7935	47,9596	152,3151
E9518	Grade de 24 discos rebocável de 24"	1,00000	0,80	0,40	2,8386	1,9732	2,4924
E9524	Motorveladora - 93 kW	1,00000	1,00	0,00	177,4458	77,1136	177,4458
E9782	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,83	0,17	142,1559	64,5771	128,9675
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	0,87	0,13	120,8028	53,5972	112,0659
E9577	Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,80	0,40	82,3695	31,5573	82,0448
				<b>Custo horário total de equipamentos</b>		<b>635,3313</b>	
<b>B - MÃO DE OBRA</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Horário</b>		<b>Custo Horário Total</b>		
P9824	Servente	1,00000	h	16,1244		16,1244	
				<b>Custo horário total de mão de obra</b>		<b>16,1244</b>	
				<b>Custo horário total de execução</b>		<b>651,4557</b>	
				<b>Custo unitário de execução</b>		<b>4,4550</b>	
				<b>Custo do FIC</b>		<b>0,0995</b>	
				<b>Custo do FIT</b>		<b>-</b>	
<b>C - MATERIAL</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço Unitário</b>		<b>Custo Unitário</b>		
M0191	Brita 1	0,68787	m <sup>3</sup>	86,2900		45,5856	
				<b>Custo unitário total de material</b>		<b>45,5856</b>	
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unitário</b>		<b>Custo Unitário</b>		
4816096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	0,55013	m <sup>3</sup>	0,8900		0,4896	
				<b>Custo total de atividades auxiliares</b>		<b>0,4896</b>	
				<b>Subtotal</b>		<b>60,6288</b>	
<b>E - TEMPO FIXO</b>	<b>Código</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unitário</b>		<b>Custo Unitário</b>	
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914647	1,03151	l	0,9900		1,0212
4816096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914354	1,03150	l	1,3300		1,3719
				<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>		<b>2,3931</b>	
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>DMT</b>			<b>Custo Unitário</b>	
			<i>LN</i>	<i>RP</i>	<i>P</i>		
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	0,61890	tkm	5914359	5914374	5914389	
4816096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	1,44411	tkm	5914359	5914374	5914389	
				<b>Custo unitário total de transporte</b>		<b>53,02</b>	
				<b>Custo unitário direto total</b>		<b>53,02</b>	

Figura 4.39 – Composição de custo unitário para execução de base estabilizada granulometricamente com solo e brita (50%-50%) na pista.

Na Figura 4.40 é apresentado o custo praticado pelo sistema de custos SICRO, para execução de base ou sub-base de brita comercial, no estado de Minas Gerais na data base janeiro de 2018.

#### DNIT

#### CGCIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC 0,00762		Produção da equipe	
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2018				113,18 m <sup>3</sup>	
4011276 Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial						Valores em reais (R\$)	
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Utilização</b>		<b>Custo Horário</b>		<b>Custo Horário Total</b>	
		<i>Operativa</i>	<i>Improdutiva</i>	<i>Produtivo</i>	<i>Improdutivo</i>		
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,34	0,66	176,7935	47,9596	91,7631
E9514	Distribuidor de agregados autopropelido - 130 kW	1,00000	0,80	0,20	202,7371	88,4570	179,8811
E9524	Motorveladora - 93 kW	1,00000	0,52	0,48	177,4458	77,1136	129,2863
E9782	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,65	0,35	142,1559	64,5771	115,0033
E9530	Rolo compactador liso autopropelido vibratório de 11 t - 97 kW	1,00000	0,52	0,48	136,0663	57,4382	98,3259
				<b>Custo horário total de equipamentos</b>		<b>614,2507</b>	
<b>B - MÃO DE OBRA</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Horário</b>		<b>Custo Horário Total</b>		
P9824	Servente	1,00000	h	16,1244		16,1244	
				<b>Custo horário total de mão de obra</b>		<b>16,1244</b>	
				<b>Custo horário total de execução</b>		<b>630,3841</b>	
				<b>Custo unitário de execução</b>		<b>5,5697</b>	
				<b>Custo do FIC</b>		<b>0,0424</b>	
				<b>Custo do FIT</b>		<b>-</b>	
<b>C - MATERIAL</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço Unitário</b>		<b>Custo Unitário</b>		
				<b>Custo unitário total de material</b>		<b>-</b>	
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unitário</b>		<b>Custo Unitário</b>		
6416040	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h	1,00000	m <sup>3</sup>	106,8900		106,8900	
				<b>Custo total de atividades auxiliares</b>		<b>106,8900</b>	
				<b>Subtotal</b>		<b>112,5021</b>	
<b>E - TEMPO FIXO</b>	<b>Código</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unitário</b>		<b>Custo Unitário</b>	
6416040	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914652	2,10000	l	1,9200		4,0320
				<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>		<b>4,0320</b>	
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>DMT</b>			<b>Custo Unitário</b>	
			<i>LN</i>	<i>RP</i>	<i>P</i>		
6416040	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	2,10000	tkm	5914356	5914374	5914389	
				<b>Custo unitário total de transporte</b>		<b>116,53</b>	
				<b>Custo unitário direto total</b>		<b>116,53</b>	

Figura 4.40 – Composição de custo unitário para execução de base ou sub-base de brita graduada com brita comercial (DNIT).

Já na Figura 4.41 é apresentado o custo calculado para execução de base estabilizada granulometricamente com agregado siderúrgico.

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC		120,70 m <sup>3</sup>	
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2018		Produção da equipe		Valores em reais (R\$)	
Base ou sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria							
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>							
	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total	
		Operativa	Improdutiva	Produtiva	Improdutiva		
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10 000 l - 188 kW	1,00000	0,61	0,39	176,7935	47,9596	126,5483
E9514	Distribuidor de agregados autopropelido - 130 kW	1,00000	0,85	0,15	202,7371	88,4570	185,5951
E9518	Grade de 24 discos rebocável de 24"	1,00000	0,49	0,51	2,8386	1,9732	2,3972
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,89	0,31	142,1559	84,5771	118,1065
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	0,72	0,28	120,8026	53,5972	101,9851
E9577	Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,49	0,51	82,3695	31,5573	56,4553
<b>Custo horário total de equipamentos</b>						<b>591,6874</b>	
<b>B - MÃO DE OBRA</b>							
	Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total		
P9824	Servente	1,00000	h	16,1244		16,1244	
<b>Custo horário total de mão de obra</b>						<b>16,1244</b>	
<b>Custo horário total de execução</b>						<b>607,2118</b>	
<b>Custo unitário de execução</b>						<b>5,0308</b>	
<b>Custo do FIC</b>						<b>0,0424</b>	
<b>Custo do FIT</b>						<b>=</b>	
<b>C - MATERIAL</b>							
	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário		
<b>Custo unitário total de material</b>						<b>=</b>	
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>							
	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário		
	Usinagem de escória de aciaria em usina de 300 t/h	1,00000	m <sup>3</sup>	24,8461		24,8461	
<b>Custo total de atividades auxiliares</b>						<b>24,8461</b>	
<b>Subtotal</b>						<b>29,9193</b>	
<b>E - TEMPO FIXO</b>							
	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
6416278	Usinagem de escória de aciaria em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	5914652	2,08300	l	1,9200		3,9830
<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>						<b>3,9830</b>	
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>							
	Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário	
			LN	RP	P		
6416278	Usinagem de escória de aciaria em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m <sup>3</sup>	2,08300	l/m	5914359	5914374	5914389	
<b>Custo unitário total de transporte</b>						<b>=</b>	
<b>Custo unitário direto total</b>						<b>33,90</b>	

Figura 4.41 – Composição de custo unitário para execução de base ou sub-base com escória de aciaria.

Observa-se que o custo para execução de base ou sub-base com escória de aciaria, R\$ 33,90/m<sup>3</sup> (Figura 4.41) corresponde a menos de 30% do valor aplicado pelo sistema SICRO para execução de base ou sub-base com agregado convencional, R\$ 116,53/m<sup>3</sup> (Figura 4.40).

Em resumo, observou-se que com a utilização de agregado siderúrgico para execução de base ou sub-base, seja como componente de mistura na proporção 50%-50%, seja como componente único da camada, possibilita uma vantagem econômica que varia entre 239% a 343% em relação a utilização do agregado convencional, conforme demonstrado na Tabela 4.36.

Tabela 4.36 – Resumo dos custos calculado para execução de camadas de base ou sub-base.

Material utilizado para executar base ou sub-base	Mistura	Custo de execução	Vantagem econômica (%)
Mistura de solo + agregado convencional, na proporção 50%-50%	Na pista	R\$ 53,02/m <sup>3</sup>	Em relação a mistura com agregado convencional
Mistura de solo + agregado siderúrgico, na proporção 50-50%		R\$ 16,55/m <sup>3</sup>	320,36 %
Mistura de solo + agregado convencional, na proporção 50%-50%	Em usina	R\$ 61,24/m <sup>3</sup>	Em relação a mistura com agregado convencional
Mistura de solo + agregado siderúrgico, na proporção 50-50%		R\$ 25,58/m <sup>3</sup>	239,41 %
Agregado convencional	Em usina	R\$ 116,53/m <sup>3</sup>	Em relação ao agregado convencional
Agregado siderúrgico		R\$ 33,90/m <sup>3</sup>	343,75 %

O sistema de custos SICRO apresenta também pesquisa de mercado com preço unitário dos insumos utilizados para execução de serviços de infraestrutura rodoviária. Na Figura 4.42 é apresentado um trecho da pesquisa de preços unitário de referência para o estado de Minas Gerais, com data base janeiro de 2018. Verifica-se na pesquisa que o preço unitário da escória de aciaria R\$ 12,33/m<sup>3</sup>, equivale a apenas 18,85% do preço unitário médio de aquisição do agregado convencional R\$ 65,42/m<sup>3</sup>. Este baixo preço de aquisição da escória de aciaria frente ao praticado para a aquisição do agregado convencional, juntamente com vantagem econômica verificada na execução de camadas de pavimento constituídas com agregado siderúrgico demonstra a viabilidade econômica da utilização do agregado siderúrgico como constituinte de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

<b>DNIT</b>		<b>SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO</b>		<b>CGCIT</b>	
<b>Minas Gerais - Janeiro/2018</b>					
<b>Código</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço Unitário (R\$)</b>		
M0181	Ancoragem ativa para lajes 3 cordoalhas - D = 15.2 mm	un	543,0953		
M0184	Ancoragem ativa para lajes 4 cordoalhas - D = 15.2 mm	un	583,8644		
M0191	Brita 1	m <sup>3</sup>	66,2900		
M0192	Brita 2	m <sup>3</sup>	65,3600		
M0193	Brita 3	m <sup>3</sup>	64,6200		
M0194	Escória de aciaria	m <sup>3</sup>	12,3257		

Figura 4.42 – Pesquisa de preço unitário dos insumos SICRO (DNIT).

Na pavimentação rodoviária grande parte dos custos para execução das diversas camadas do pavimento são gerados devido a necessidade de transporte dos materiais da origem ao local de aplicação. Como tanto o agregado siderúrgico como o convencional possuem locais de origem específicos, sejam predeiras ou siderúrgicas, faz-se necessário uma avaliação econômica não só do valor de aquisição, mas também dos custos gerados com o transporte dos agregados. Conforme apresentado na Figura 4.42, para o estado de Minas Gerais, em janeiro de 2018, o agregado siderúrgico apresenta custo de aquisição, R\$ 12,33/m<sup>3</sup>, em média 5 vezes menor do que o custo de aquisição do agregado convencional, R\$ 65,42/m<sup>3</sup>. Com base neste valores observa-se que o agregado siderúrgico é mais vantajosos que o convencional até uma distância de 57,0 km do local de produção (Figura 4.43), ou seja, no caso em análise mesmo que o agregado siderúrgico seja disponibilizado em uma distância até o local de aplicação maior do que a do agregado convencional, ele mantém sua vantagem econômica até um raio de aplicação máxima de 57,0 km. Para os cálculos dos custos comparativos de transporte o valor da brita é retirada na pedreira, sem inclusão de frete, e o valor do frete para o agregado siderúrgico igual R\$ 0,45/tkm, referente ao transporte em rodovia pavimentada, e a quantidade igual a 2,063 t/m<sup>3</sup>, conforme premissas adotadas pelo SICRO.



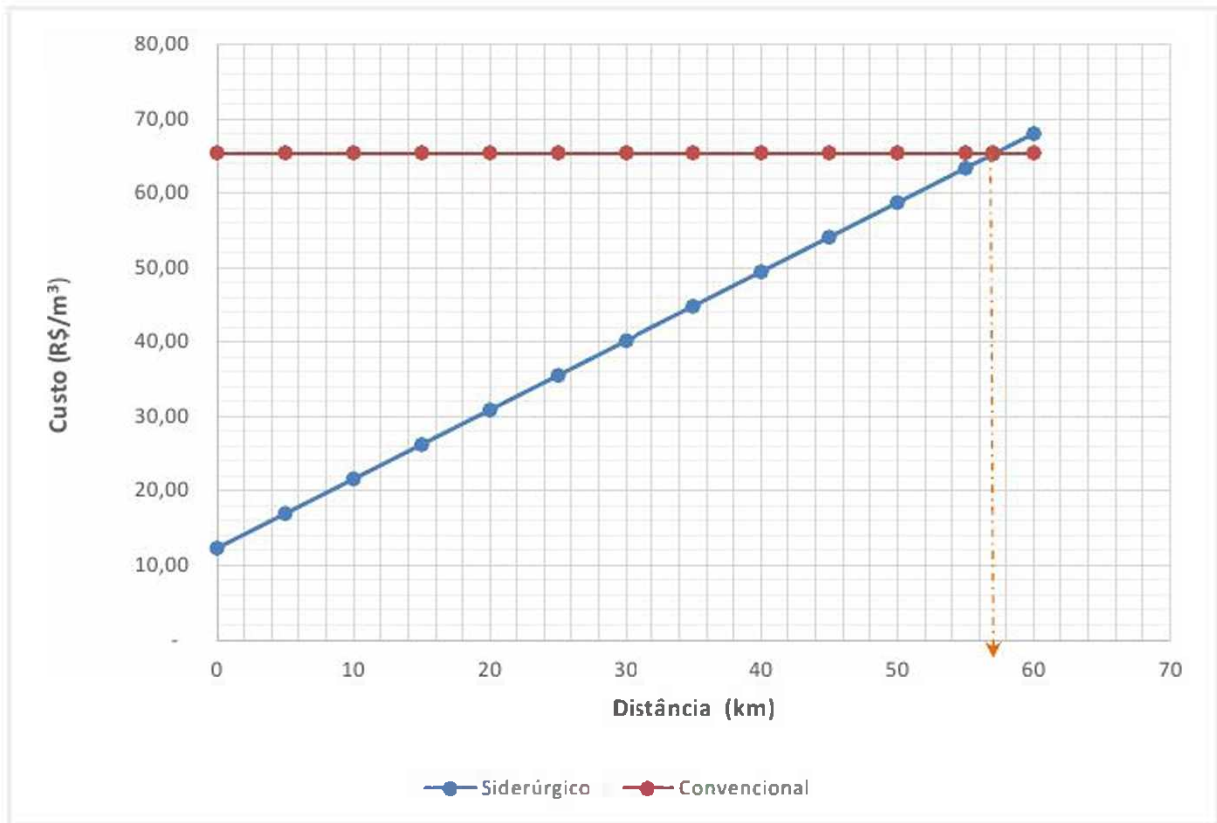


Figura 4.43 – Vantagem do agregado siderúrgico pela distância da origem em relação ao agregado convencional.

## **5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Baseado nos resultados e análises obtidos a partir dos ensaios realizados nesta pesquisa avaliou-se a adequação do açobrita, solo tropical e misturas quanto a sua aplicabilidade como material constituinte de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

### **5.1. CONCLUSÕES**

#### **5.1.1. SOLO TROPICAL**

A partir das análises granulométricas, o solo tropical, inicialmente destinado a utilização nas camadas de subleito, apresentou-se como um solo siltoso de baixa plasticidade, com um percentual médio de aproximadamente 37% de silte e 27% de argila, com índice de plasticidade máximo igual a 8% e índice de grupo igual a 5, sendo enquadrado conforme AASHTO no grupo A-4, um solo siltoso com comportamento geralmente fraco a pobre como subleitos. Estas características indicam que o solo não apresenta comportamento adequado para utilização em camadas de base ou sub-base de pavimentos rodoviários, conforme parâmetros estabelecidos nas normas rodoviárias vigentes.

O solo apresentou comportamento não laterítico, quando avaliado pela metodologia MCT, enquadrando-se com solo argiloso não laterítico (NG<sup>+</sup>), baseado neste resultado, juntamente com a granulometria verificada, pode-se associar essas características a de uma rocha matriz basaltos, biabásicos, com estrutura pseudo-estratificadas disposta em camadas verticais, conforme dados disponibilizados na literatura.

A curva de compactação obtida apresentou aspecto de curvas de solos tipicamente coesivos, com umidade ótima igual a 19,6% e peso específico máximo aparente seco igual a 17,13 kN/m<sup>3</sup>. O solo apresentou uma densidade real dos grãos igual a 2,797 correspondendo a um valor alto se comparado a média dos solos brasileiros.

O Índice de Suporte Califórnia, utilizando a energia de compactação do Proctor modificado, foi igual a 58% com expansão máxima de 0,46%. Os resultados indicam um material com comportamento adequado apenas para utilização em camadas de sub-base de pavimento rodoviários.

Desta forma, pode-se considerar que a associação do solo tropical estudado com um outro material de melhor comportamento físico e mecânico poderia viabilizar a sua utilização como

constituente de camadas de base de pavimentos rodoviários, melhorando as suas características granulométricas, de plasticidade e capacidade de suporte.

### 5.1.2. AÇOBRITA

O açobrita analisado enquadrou-se, conforme classificação AASHTO, no grupo A-1-a referente a um material que é predominantemente constituído por pedra britada, pedregulho e areia, que são considerados com comportamento em geral excelente e bom como subleitos. Nos ensaios de limites de consistência, determinou-se que o agregado siderúrgico apresenta como característica a não plasticidade, propriedade típica de materiais granulares. O açobrita apresentou ainda uma perda por abrasão obtida pelo ensaio *Los Angeles* igual a 28%. Estas características indicam um comportamento desejado para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, conforme parâmetros estabelecidos pela ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

A curva de compactação do açobrita apresentou comportamento similar as curvas obtidas para solos granulares, como areias limpas, com peso específico determinado igual a 22,98 kN/m<sup>3</sup> na umidade ótima de compactação de 13,3%. A densidade real dos grãos do açobrita, conforme esperado, apresentou um valor alto, igual a 3,331, quando ensaiado conforme metodologia ME-093 (DNER, 1994), e médio de 3,518, quando ensaiado com utilização do equipamento Pentapicnômetro. Com utilização do referido equipamento, observou-se também uma variação grande do valor de densidade real dos grãos com o tamanho dos grãos.

Obteve-se um valor médio do percentual de absorção de água para o açobrita igual a 1,85%, atendendo ao requisito especificado pela norma EM-262 (DNER, 1994), habilitando a escória de aciaria a ser aplicada em camadas de pavimento.

O valor de Índice de Suporte Califórnia na umidade ótima obtido para o açobrita foi de 169%, mostrando-se superior aos valores apresentados por agregados convencionais, apresentou ainda expansão máxima igual a 0,02%, e quando ensaiado pela metodologia ME-113 (DNIT, 2009) apresentou expansão média igual a 1,390%, demonstrando a efetividade do processo de cura ao qual o material foi submetido ainda na siderúrgica.

Observou-se que o agregado siderúrgico, açobrita, apresenta características adequadas para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, consoante parâmetros preconizados nas especificações de serviços ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

A viabilidade econômica para utilização do agregado siderúrgico foi verificada através do comparativo do seu custo de aquisição em relação ao custo de aquisição do agregado convencional, com base na pesquisa de preços do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), onde foi verificado que o agregado siderúrgico apresenta custo de aquisição, em média, 5 vezes menor do que o custo de aquisição do agregado convencional. Avaliou-se também que os custos para execução de camadas de pavimento estabilizada granulometricamente utilizando o açobrita apresenta uma vantagem econômica de aproximadamente 343% em relação ao custo para execução de camadas com agregado convencional.

Verificou-se ainda que, mesmo que o agregado siderúrgico seja disponibilizado em uma distância até o local de aplicação maior do que a do agregado convencional, ele mantém sua vantagem econômica até um raio de aplicação de 57,0 km.

### **5.1.3. MISTURAS M4060, M5050 E M6040**

Nos ensaios de limite de consistência as três misturas não apresentaram plasticidade, mesmo a mistura M4060 que possui em sua constituição apenas 40% de açobrita. Esta condição demonstrou a grande influência do açobrita nas misturas, tornando as misturas com características desejadas para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

A mistura M4060 enquadrou-se no grupo A-4, conforme classificação AASHTO, e apresentou um índice de grupo médio igual a 2, não atendendo as características granulométricas necessárias para utilização como camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, conforme normas vigentes.

As misturas M5050 e M6040 enquadraram-se na classificação A-2-4, conforme AASHTO, equivalente a materiais que predominam areia siltosa ou argilosa, considerado com comportamento em geral excelente a bom como subleito. Observou-se que as misturas não se enquadram nas faixas granulométricas estabelecidas pela ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), estando, porém dentro da faixa B estabelecida nas normas ES-114 (DNIT, 2009) e ES-115 (DNIT, 2009) para utilização como base e sub-base estabilizada granulometricamente em rodovias com  $N < 10 \times 10^6$ .

Observou-se, em geral, um valor médio de densidade real dos grãos crescente tanto com o aumento do teor de açobrita na mistura, quante com o crescimento médio do tamanho das

partículas das misturas. As curvas de compactação obtidas demonstraram um aumento do peso específico aparente seco máximo das misturas com o aumento do teor de açobrita e uma consequente diminuição no teor de umidade ótima. As curvas de variação do índice de vazios em função da umidade ótima revelaram menores valores de índices de vazios a medida que o teor de açobrita foi aumentado na mistura, denotando uma maior efetividade no processo de compactação das misturas com maior percentual de agregado siderúrgico.

As três misturas apresentaram Índices de Suporte Califórnia entre 120% e 300% superior ao apresentado pelo solo tropical puro, demonstrando a grande capacidade de carga proporcionada pela presença do açobrita. A expansão máxima das três misturas foi de 0,17%, relacionado à mistura M5050. Já os valores de expansão obtidos para as três misturas, pela metodologia ME-113 (DNIT, 2009), foram inferiores a 1,00%. Os valores de ISC e expansão obtidos para as misturas satisfazem plenamente os requisitos preconizados pela ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), indicando que as misturas são adequadas para serem utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários qualquer que seja o N de projeto.

Isto posto, embora os resultados obtidos indiquem que as misturas não se enquadrem nas faixas granulométricas exigidas nas ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017), verificou-se que esta característica tem pouca influência no comportamento das misturas, fundamentalmente na capacidade de suporte e no potencial de expansão, indicando a possibilidade de realização de estudos complementares do comportamento de misturas de açobrita com solos tropicais, a fim de reavaliar os parâmetros contidos nas especificações ES-406 (DNIT, 2017) e ES-407 (DNIT, 2017).

Ademais foi verificada a vantagem econômica na utilização de misturas compostas por solo e agregado siderúrgico (açobrita) em relação a misturas compostas por solo e agregado convencional (brita), ambas nas proporções de 50% agregado e 50% solo. No comparativo constatou-se que a utilização de misturas com açobrita mostra-se entre 239% a 320% mais vantajosa do que as misturas utilizando agregado convencional.

## **5.2. RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

A presente dissertação constitui-se em mais uma etapa no estudo da aplicabilidade do agregado siderúrgico, açobrita, como constituinte de camadas de pavimento rodoviário, assunto de extrema importância do ponto de vista técnico, econômico e ambiental na construção e

reabilitação de pavimentos rodoviários. Assim, sugere-se a seguir alguns temas para pesquisas futuras:

- realizar ensaios para determinação da deformação permanente do açobrita e de misturas de solos tropicais e açobrita, para verificação de propriedades mecânicas, quando submetidos a cargas móveis do tráfego.
- realizar ensaios de módulo de resiliência em amostras de açobrita e misturas de açobrita e solos tropicais.
- realizar estudos mineralógicos e químicos, das mudanças nos valores de densidade real dos grãos do açobrita, permitindo assim um melhor entendimento do seu comportamento.
- estudar a influência da mistura do açobrita no melhoramento de solos de alta plasticidade.
- avaliar os efeitos da sobrecarga nos ensaios de expansão pelo método ISC e pelo método ME – 113 (DNIT, 2009), assim como as implicações das variações na energia de compactação dos corpos-de-prova e na temperatura dos ensaios.
- avaliar a compatibilidade e interação físico-química do açobrita e outros solos de comportamento laterítico e não laterítico.
- estabelecer uma caracterização química e mineralógica do açobrita, bem como avaliar as possíveis diferenças entre os agregados siderúrgicos produzidos no Brasil.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (2008). Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico, Gestão de Coprodutos – Nota Técnica. Brasília, DF. — Procedimento.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). NBR 11582, Cimento Portland - Determinação da expansão de Le Chatelier.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10004, Resíduos Sólidos – classificação.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10005, Lixiviação de Resíduos – Procedimento.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10006, Solubilização de Resíduos – Procedimento.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10007, Amostragem de Resíduos Sólidos – Procedimento.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR NM 53, Agregado graúdo - Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água – Método de Ensaio.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). NBR 16364, Execução de Sub-base e Base Estabilizadas Granulometricamente com Agregado Siderúrgico para Pavimentação Rodoviária – Procedimento.
- ALVARENGA, J. C. A. (2001) Um Estudo para a Avaliação Estrutural e Econômica de Pavimentos Flexíveis de Escória de Aciaria. Dissertação de mestrado, COPPE/Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (1993). C151, Ensaio de Expansão por Autoclave em Cimento Portland.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2000). D698, Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soils Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)).
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2000). D4792, Standard Test for Potencial Expansion of Aggregates from Hydration Reactions.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2005). D1883, Standard Test Method for CBR (California Bearing Ration) of Laboratory- Compacted Soil.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2003). D2940, Standard Specification for Graded Aggregate Material for Bases or Subbases for Highways or Airports.

- ASTM – American Society for Testing and Materials (2014). D5550, Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer.
- BARBOSA, M. (2013). Caracterização Geoambiental da Escória de Aciaria de Cinco Estados Brasileiros. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- BRASIL. Decreto nº 7.983, de 08 de abril de 2013. Estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, de 9 de abril de 2013.
- CARVALHO FILHO, A. F. (2006). Utilização do Agregado Siderúrgico no Municípios de Praia Grande. Workshop: Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro, ABM, São Paulo, SP, 08 de Novembro.
- CASTELO BRANCO, V. T. F. (2004). Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CEN – European Committee for Standardization (2002). EN 12457-2, Characterization of Waste – Leaching – Compliance Test for Leaching of Granular Waste Materials and Sludges: One Stage Batch Test at Liquid to Solid Ratio of 10l/kg for Materials With Particle Size Below 4mm (Without or With Size Reduction).
- CEN – European Committee for Standardization (2002). EN 12457-4, Characterization of Waste – Leaching – Compliance Test for Leaching of Granular Waste Materials and Sludges: One Stage Batch Test at Liquid to Solid Ratio of 10l/kg for Materials with Particle Size Below 10mm (Without or With Size Reduction).
- CEN – European Committee for Standardization (2002). EN 1744-3, Test for Chemical Properties of Aggregates – Preparation of Eluates by Leaching of Aggregates.
- CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010). Siderurgia no Brasil 2010-2025: Subsídios para Tomada de Decisão – Brasília, 2010. 112 p.
- CNI/IAB – Confederação Nacional da Indústria / Instituto Aço Brasil (2012). A Indústria do Aço no Brasil – Brasília, 2012. 48 p.
- DER/MG – Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais (1982). DMA-1, Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão da Escória de Aciaria – Adaptação do PTM 130.
- DIN – Deutsches Institut für Normung – Instituto Alemão de Normatização (1998). EN 1744-1, Test par Propriedades Químicas de Agregados – Análises Químicas.
- DONIZETTI, A. (2010). Utilização da Escória de Aciaria Pura e com Adição de Argila como Camada de Base em Pavimento Rodoviário. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.



- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 041, Solos – Preparação de Amostras para Ensaio de caracterização – Método de Ensaio.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). EM 260, Emprego da Escória de Alto-forno em Pavimento Rodoviário – Especificação de Material.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). EM 262, Escória de Aciaria para Pavimento Rodoviário – Especificação de Material.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). PRO 263, Emprego da Escória de Aciaria em Pavimentos Rodoviários – Procedimento.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 256, Solos Compactados com Equipamento Miniatura – Determinação de Perda de Massa por Imersão – Método de Ensaio.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 258, Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Mini -MCV – Método de Ensaio.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 051, Solos – Análise Granulométrica – Método de Ensaio.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 080, Solos – Análise Granulométrica por Peneiramento – Método de Ensaio.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 082, Solos – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 093, Solos – Determinação da Densidade Real – Método de Ensaio.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 122, Solos – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996). CLA 259, Solos – Classificação de Solos Tropicais para Finalidades Rodoviárias Utilizando Corpos-de-prova Compactados em Equipamentos Miniatura – Classificação.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 035, Agregado – Determinação da Abrasão “Los Angeles” – Método de Ensaio.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009). ME 113, Pavimentação Rodoviária – Agregado Artificial – Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria – Método de Ensaio.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009). ES 114, Pavimentação Rodoviária – Sub-base Estabilizada Granulometricamente com Escória de Aciaria – ACERITA® - Especificação de Serviço.

- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009). ES 115, Pavimentação Rodoviária – Base Estabilizada Granulometricamente com Escória de Aciaria – ACERITA<sup>®</sup> - Especificação de Serviço.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). ES 141, Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). ES 139, Pavimentação – Sub-base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013). ME 164, Solos – Compactação Utilizando Amostras não Trabalhadas – Método de Ensaio.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2016). ME 172, Solos – Determinação do Índice de Suporte de Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas – Método de Ensaio.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2016). Rede Rodoviária do Plano Nacional de Viação, atualizado até julho de 2016.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2017). ES 406, Pavimentação Rodoviária – Base Estabilizada Granulometricamente com Açobrita<sup>®</sup> - Especificação de Serviço.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2017). ES 407, Pavimentação Rodoviária – Sub-base Estabilizada Granulometricamente com Açobrita<sup>®</sup> - Especificação de Serviço.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2017). Manual de custos de Infraestrutura de Transportes.
- FERREIRA, S. M. R. (2010). Comportamento Mecânico e Ambiental de Materiais Granulares – Aplicação às Escórias de Aciaria Nacionais. Tese de Doutorado, Universidade de Minho, Braga, Portugal.
- FREITAS, H. B. (2007). Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FCT – Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora (2005). Projeto IBS, 2º Relatório Técnico de Acompanhamento: Apresentação ensaios de caracterização do agregado siderúrgico. Juiz de Fora, MG, Brasil. 108 p.
- GEYER, R. M. T. (2001). Estudo Sobre a Potencialidade de Uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- GUPTA, D. J. et al. (1994). Characterization of Base and Subbase Iron Steel Slag Aggregates Causing Deposition of Calcareous Tufa in Drains. Transportation Research Record 1434, p.

- 8-17.s.d.
- IABR – Instituto Aço Brasil (2018). Estatística Preliminar. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/estatisticas.asp?par=20184>> Acesso em: 23 de maio de 2018.
- IABR- Instituto Aço Brasil (2016). Relatório de Sustentabilidade. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>> Acesso em: 20 de março de 2018.
- IABR – Instituto Aço Brasil (2018). Processo Siderúrgico. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>> Acesso em: 23 de março de 2018.
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração (2018). Economia Mineral do Brasil. Disponível em: <<http://portaldamineração.com.br>> Acesso em: 3 de junho de 2018.
- IPR – Instituto de Pesquisa Rodoviária (1998). Escória Siderúrgica – Material de Múltiplas Aplicações, MT/DNER/IPR.
- ISO – International Organization for Standardization (2006). ISO 14040: Environmental Management. Life Cycle assessment. Principles and Framework.
- JAPAN INSTITUTE STANDARD (1991). JIS R 2211 – Test method for hydration resistance of basic bricks.
- JAPAN INSTITUTE STANDARD (1992). JIS A 5015 – Escória siderúrgica para construção de estradas – (tradução em português).
- LIMA, N. P., NASCIMENTO, J. F., VAL FILHO, V. P. C., ALBARNEZ, 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 do Departamento de Engenharia de Construção Civil - POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil. 135 p.
- MANCIO, M. (2001). Contribuição ao Estudo do Fenômeno de Instabilidade Volumétrica das Escórias de Aciaria Elétrica. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.
- MASUERO, A. B; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D (2000). Emprego de escória de aciaria elétrica como adição a concretos. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, São Paulo, Brasil.
- MASUERO, A. B; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D (2004). Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. Ambiente Construído. v.4, n.2. Porto Alegre, Brasil.
- MOTA, L. M. G., FREITAS, H. B. de (2008). Uso de escória de aciaria em mistura asfáltica de módulo elevado. Revista Transportes, vol. XVI, n. 2, 5-12p. Brasil.

- 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 Metropolitana de Fortaleza. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- PennDOT – Pennsylvania Departamento of Transportation (1978). Pennsylvania Testing Method 130 (PTM 130) - Evaluation of Potential Expansion of Steel Slags.
- PennDOT – Pennsylvania Departamento of Transportation (2003). Publication 408 – Highway Construction Specifications.
- POLESE, M. de O. (2007). Estudo da Expansibilidade e da Microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.
- RAPOSO, C. (2005). Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação. Dissertação de mestrado da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil. 163 p.
- RESENDE, A. D. (2010). Utilização da escoria de aciaria pura e com adição de argila como camada de base em pavimentação rodoviária. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 210 p.
- RIZZO, E. M. da S.(2006). Introdução aos processos de refino primário dos aços nos convertedores a oxigênio. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006. 118 p.
- RHODE, L. (2002). Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial. Dissertação de mestrado em engenharia Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 101 p.
- RHODE, L; NUÑEZ, W e CERATTI, J. (2003). Escória de aciaria elétrica: uma alternativa aos materiais granulares tradicionais. Revista de Transportes, vol. XI, ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Brasil.
- RODRIGUES, G. L. (2007). Caracterização e Avaliação da Expansibilidade de Aciaria LD não Trabalhadas e Tratadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.
- RUBIO, A. R. e CARRETERO, J. G. (1991). Application of Steel slags in roadways (in Spanish). Civil engineering, Spain.
- SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (2001). Forno Elétrico a Arco (FEA). Disponível em: < <https://slideplayer.com.br/slide/10152186/>> Acesso em: 3 de junho de 2018.
- 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, RJ, Brasil.
- SILVA, E. A., MENDONÇA R. L. e DOBELE, C. H. M. (2002). Utilização de escória de aciaria em todas as camadas do pavimento. 16º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ.
- SOUZA, M. L. (1980) Pavimentação rodoviária. Livros Técnicos e Científicos S. A. Rio de Janeiro. Brasil
- SOUZA, G. M. (2007). Estudo Experimental de Escórias de Aciaria para Fins de Caracterização Tecnológica como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 124p.
- STEEL – Technology.com™ (2018). Articles: Oxygen Furnace Steelmaking. Disponível em: <<https://www.steel-technology.com/articles/oxygenfurnace>> Acesso em: 27 de abril de 2018.
- TARAZONA, N. (2016). Aplicabilidade agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85 p.