CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO SOBRE O USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA DE FORNO ELÉTRICO COMO AGREGADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Jacson Samuel Pacheco

Lajeado, junho de 2017.

Jacson Samuel Pacheco

ESTUDO SOBRE O USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA DE FORNO ELÉTRICO COMO AGREGADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Carolina B. P. Fransozi

Lajeado, junho de 2017.

Jacson Samuel Pacheco

ESTUDO SOBRE O USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA DE FORNO ELÉTRICO COMO AGREGADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Profª. Me. Carolina B. P. Fransozi – Orientadora
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos –
Centro Universitário UNIVATES

Profª. Me. Betina Hansen –
Centro Universitário UNIVATES

Lajeado, junho de 2017.

Conhecimento não é aquilo que você sabe,
mas o que você faz com aquilo que você sabe.
(Aldous Huxley)

AGRADECIMENTOS

Aos amigos do Laboratório de Tecnologias da Construção – LATEC da Univates, Marcelo Costa e Rodrigo Weizenmann, e a minha orientadora, Profª. Me. Carolina B. P. Fransozi, pelo apoio, sempre dispostos a ajudar e me orientar em tudo que era preciso.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC e ao Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária – GEPPASV da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht e Eduardo Londero Druzian, pela disposição e apoio nos ensaios solicitados.

Agradeço à empresa Conpasul, pelo fornecimento dos agregados naturais e aos laboratoristas Srs. Ederson Garcia De Quadros Garcia e Nelson Galimberti, sempre dispostos a sanar minhas dúvidas.

Agradeço à empresa Harsco Metals, pelo fornecimento do agregado siderúrgico e ao Sr. Roger Briccius Barbosa pela disposição em colaborar com este estudo.

E por fim, dedico este trabalho aos meus pais e minha noiva Janaine. Deixo aqui meu muito obrigado a todos que de alguma forma colaboraram nesta jornada, não só no desenvolvimento deste estudo, mas ao longo de todos os anos da minha graduação.

RESUMO

Este estudo aborda a utilização do agregado siderúrgico em misturas asfálticas, substituindo a brita convencional. O agregado siderúrgico é proveniente da escória do aço, sendo então um material sustentável, oriundo de um resíduo. Este trabalho tem por objetivo oferecer ao mercado uma opção viável para utilização como agregado, tanto no âmbito econômico quanto ambiental, visto que o agregado siderúrgico possui preço de venda menor e é proveniente de resíduos da indústria metalúrgica. Para a pesquisa foram realizados levantamentos bibliográficos, acerca de conceitos quanto à pavimentação e sua estrutura, os agregados e a sua função na mistura asfáltica. Foram elaboradas quatro misturas com diferentes percentuais de agregado siderúrgico, também chamado comercialmente de neobrita, e através dos ensaios Marshall, de resistência à tração e do ensaio de módulo de resiliência comprovou-se que o uso do agregado siderúrgico em misturas asfálticas atende às especificações da norma DNIT quanto à resistência das misturas. Verificou-se porém um aumento nos percentuais de teor de ligante ideal da mistura na medida em que cresciam os percentuais de agregado siderúrgico nas misturas asfálticas desenvolvidas. A utilização de materiais sustentáveis, como o agregado siderúrgico, contribui com a necessidade humana atual de criar novos métodos construtivos, menos agressivos ao meio ambiente.

Palavras-chave: Agregado Siderúrgico. Misturas Asfálticas. Sustentabilidade. Neobrita.

ABSTRACT

This study discusses the use of the steel aggregate in asphalt mixtures, replacing the conventional gravel. The steel aggregate comes from steel slag, being, therefore, a sustainable residual material. The study aims to bring to the market a feasible option of an aggregate, both economically and environmentally, since the steel aggregate has a lower selling price and comes from the metallurgical industry. Bibliographical surveys, about paving concepts and structures, aggregates and their function in the asphalt mixture. Four mixtures were performed with different percentages of steel aggregate, which is also known as ferrous slag. Through Marshall tests, tensile strength tests and resilience modulus test it was verified that the use of aggregate in asphalt mixtures meets the specifications of the Brazilian DNIT standards for mixture strength. There was, however, an increase in the percentages of ideal binder content of the mixture as the percentages of steel aggregate in the developed asphalt mixtures increased. The use of sustainable materials, such as steel aggregate, contributes to the current human need to create new constructive methods, less aggressive to the environment.

Keywords: Steel aggregate. Asphalt Mixtures. Sustainability. Neobrita.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas genéricas de um pavimento asfáltico.....22
Figura 2 – Aplicação de camada de ligação.....24
Figura 3 - Distribuição das cargas em pavimentos rígidos e flexíveis.....25
Figura 4 - Exemplo de agregados naturais - seixos.....29
Figura 5 - Exemplo de agregado artificial - Agregado Siderúrgico.....30
Figura 6 - Gráfico convencional das curvas granulométricas.....32
Figura 7 - Matéria prima da escória (sucata).....34
Figura 8 - Esquema de produção da escória de alto-forno.....35
Figura 9 - Produção da escória em forno elétrico.....36
Figura 10 - Basculamento da escória.....37
Figura 11 - Resfriamento da escória após basculamento.....37
Figura 12 – Rolo imantado para separação magnética metal/escória.....38
Figura 13 – Processo de separação magnética metal/escória.....38
Figura 14 - Pavimento com erupção por expansão da escória.....39
Figura 15 – Lançamento de jatos de água quente sobre a escória.....40
Figura 16 – Materiais utilizados nas duas misturas asfálticas.....48
Figura 17 - Gráfico DNIT para faixas granulométricas de misturas asfálticas.....51
Figura 18 - Análise granulométrica por peneiramento.....53
Figura 19 - Realização da mistura entre agregados e ligante.....59
Figura 20 - Compactador mecânico de corpos de prova para misturas asfálticas.....60
Figura 21 - Corpos de prova moldados através do Ensaio Marshall.....61
Figura 22 - Corpos de prova em banho-maria à 60º C.....63
Figura 23 - Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall.....64
Figura 24 - Realização do ensaio de compressão diametral.....69
Figura 25 - Ruptura do corpo de prova no ensaio de compressão diametral.....69

Figura 26 - Exemplo de fixação e aplicação de carga na determinação do módulo de resiliência 71
Figura 27 - Aparelho para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas 72
Figura 28 - Porosidade do agregado siderúrgico de aciaria elétrica 75
Figura 29 - Curva granulométrica da mistura 01 com 100% de agregados naturais.78
Figura 30 - Teor de ligante x Volume de vazios - Mistura 01 80
Figura 31 – Resultados do ensaio Marshall da Mistura 01 expressos em gráficos...80
Figura 32 - Curva granulométrica da mistura 02 com 75% de agregados naturais e 25% de neobrita 84
Figura 33 - Teor de ligante x Volume de vazios - Mistura 02 86
Figura 34 - Resultados do ensaio Marshall da mistura 02 expressos em gráficos....87
Figura 35 - Curva granulométrica da mistura 03 com 50% de agregados naturais e 50% de neobrita 90
Figura 36 - Teor de ligante x Volume de vazios - Mistura 03 91
Figura 37 - Resultados do ensaio Marshall da Mistura 03 expressos em gráficos....92
Figura 38 - Curva granulométrica da mistura 04 com 25% de agregados naturais e 75% de neobrita 96
Figura 39 - Teor de ligante x Volume de vazios - Mistura 04 97
Figura 40 - Resultados do ensaio Marshall da Mistura 04 expressos em gráficos....98
Figura 41 - Curva granulométrica da mistura 05 com 100% de neobrita 102
Figura 42 - Curvas granulométricas das 4 misturas desenvolvidas 104
Figura 43 - Gráfico comparativo: Densidade da Mistura *x* Teor de Ligante 106
Figura 44 – Gráfico comparativo: Estabilidade Marshall *x* Fluência Marshall 107
Figura 45 - Gráfico comparativo: R.B.V. *x* V.A.M. 107
Figura 46 - Gráfico comparativo: Resistência à compressão diametral *x* estabilidade Marshall.....108
Figura 47 - Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência.....109
Figura 48 - Relação MR/RT das misturas asfálticas 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Densidade de malha rodoviária pavimentada em alguns países 21
Tabela 2 - Dimensões nominais das peneiras.....31
Tabela 3 – Produção de aço bruto da América Latina (unid: 10^3 t) 33
Tabela 4 – Composição química da escória de aciaria elétrica em diferentes países 36
Tabela 5 – Especificações brasileiras para o cimento asfáltico de petróleo (CAP) ...49
Tabela 6 – Composição das misturas Faixas A, B e C do DNIT 50
Tabela 7 - Relação dos projetos de mistura asfáltica.....52
Tabela 8 – Faixas granulométricas para o Ensaio “Los Angeles” 54
Tabela 9 – Cargas abrasivas para o ensaio “Los Angeles” 55
Tabela 10 – Massa mínima de amostra de ensaio do agregado graúdo.....56
Tabela 11 - Correção da estabilidade em função da espessura do corpo de prova..65
Tabela 12 - Limites de *Vv* e *RBV* conforme faixa granulométrica da mistura.....67
Tabela 13 - Resultados do ensaio de absorção dos agregados.....74
Tabela 14 - Análise granulométrica da mistura 01 76
Tabela 15 - Cálculo dos percentuais de cada material da mistura 01 com 100% de agregados naturais.....77
Tabela 16 - Percentuais totais da mistura 01 77
Tabela 17 - Quantidades utilizadas para moldagem dos CP’s da mistura 01 79
Tabela 18 - Resultados do ensaio Marshall - Mistura 01 79
Tabela 19 - Resultados do ensaio de compressão diametral da mistura 01 82
Tabela 20 - Análise Granulométrica da mistura 02 83
Tabela 21 - Cálculo dos percentuais de cada material da mistura 02 com 75% de agregados naturais e 25% de neobrita.....83

Tabela 22 - Percentuais totais da mistura 02 84
Tabela 23 - Quantidades utilizadas para moldagem dos CP's da mistura 02 85
Tabela 24 - Resultados do ensaio Marshall - Mistura 02 86
Tabela 25 - Resultados do ensaio de compressão diametral da mistura 02 88
Tabela 26 - Análise Granulométrica da mistura 03 89
Tabela 27 - Cálculo dos percentuais de cada material da mistura 03 com 50% de agregados naturais e 50% de neobrita 89
Tabela 28 - Percentuais totais da mistura 03 90
Tabela 29 - Quantidades utilizadas para moldagem dos CP's da mistura 03 91
Tabela 30 - Resultados do ensaio Marshall - Mistura 03 92
Tabela 31 - Resultados do ensaio de compressão diametral da mistura 03 94
Tabela 32 - Análise granulométrica da mistura 04 95
Tabela 33 - Cálculo dos percentuais dos materiais da mistura 04 com 25% de agregados naturais e 75% de neobrita 95
Tabela 34 - Percentuais totais da mistura 04 96
Tabela 35 - Quantidades utilizadas para moldagem dos CP's da mistura 04 97
Tabela 36 - Resultados do ensaio Marshall - Mistura 04 98
Tabela 37 - Resultados do ensaio de compressão diametral da mistura 04 100
Tabela 38 - Análise granulométrica da mistura 05 100
Tabela 39 - Cálculo dos percentuais dos materiais da mistura 05 com 100% de neobrita 101
Tabela 40 - Percentuais totais da mistura 05 101
Tabela 41 - Análise granulométrica das 5 misturas desenvolvidas 103
Tabela 42 - Resultados encontrados neste estudo 105
Tabela 43 - Resultados do ensaio de compressão diametral e módulo de resiliência de outros autores e deste estudo 111

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Percentual de massa retida em cada peneira.....53

Equação 2 - Abrasão “Los Angeles”.....55

Equação 3 - Massa específica aparente do agregado.....57

Equação 4 - Massa específica real do agregado.....57

Equação 5 - Absorção do agregado.....57

Equação 6 – Volume de ligante à adicionar na mistura.....58

Equação 7 – Densidade aparente da mistura.....61

Equação 8 – Densidade máxima medida.....64

Equação 9 – Volume de vazios.....66

Equação 10 – Volume total de vazios formado pelo agregado.....67

Equação 11 – Relação de betume/vazios.....67

Equação 12 – Estabilidade Marshall.....67

Equação 13 – Resistência à tração por compressão diametral.....70

Equação 14 – Ensaio de Módulo de Resiliência.....70

Equação 15 – Módulo de resiliência.....72

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABEDA - Associação Brasileira das Empresas. Distribuidoras de Asfaltos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional do Petróleo

CA – Concreto Asfáltico

$CaFe_2O_4$ – Ferrita cálcica

CaO – Óxido de cálcio

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

$CaSiO_3$ – Silicatos de cálcio

CBUQ – Concreto betuminoso usinado à quente

Cm – Centímetros

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CP – Corpo de Prova

CPA – Camada porosa de atrito

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

EUA – Estados Unidos da América

Kgf – Quilograma força

MgO – Óxido de magnésio

Mm – Milímetros

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Norma Brasileira

Pol – Polegadas

RT – Resistência à tração

SiO_2 – Óxido de silício

SMA – *Stone matrix asphalt*

T – Tonelada

TiO2 - Dióxido de Titânio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 Justificativa e relevância da pesquisa 17
1.2 Objetivo geral 18
1.3 Objetivos específicos 18
1.4 Delimitação do trabalho 19
1.5 Estrutura do trabalho 19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
2.1 Introdução à Pavimentação 20
2.2 As Camadas dos Pavimentos 22
2.2.1 Subleito 23
2.2.2 Reforço de Subleito 23
2.2.3 Base e Sub-base 23
2.2.4 Imprimação e pintura de ligação 23
2.2.5 Revestimento 25
2.3 Tipos de Pavimentos 25
2.3.1 Pavimentos de Concreto - Definição 26
2.3.2 Pavimentos Asfálticos - Definição 26
2.4 Os Agregados 28
2.4.1 Classificação quanto à origem dos agregados 29
2.4.2 Classificação quanto ao tamanho 30
2.4.3 Classificação quanto à granulometria 30
2.5 O agregado siderúrgico 32
2.5.1 A produção do agregado siderúrgico 34
2.5.2 A expansibilidade do agregado siderúrgico 39
2.5.3 O fator ambiental no uso do agregado siderúrgico 41
2.5.4 O fator econômico do agregado siderúrgico 42
2.5.5 A utilização da escória como agregado 42
3 MATERIAIS E MÉTODOS 47
3.1 Materiais 47
3.1.1 Agregados Graúdos 48
3.1.2 Agregado Fino 49
3.1.3 Ligante Asfáltico 49
3.2 Métodos 50
3.2.1 Análise granulométrica dos agregados 52

3.2.2 Ensaio de Abrasão “Los Angeles” dos agregados 54
3.2.3 Determinação da absorção e da densidade dos agregados 56
3.2.4 Ensaio Marshall para misturas asfálticas 58
3.2.5 Massa específica aparente da mistura asfáltica 61
3.2.6 Estabilidade e fluência Marshall 62
3.2.7 Massa específica máxima teórica (DMT) 65
3.2.8 Volume de vazios, relação betume/vazios e teor de projeto 66
3.2.9 Resistência à tração por compressão diametral 68
3.2.10 Módulo de Resiliência 70
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 74
4.1 Mistura 01 - 100% de agregados naturais 76
4.2 Mistura 02 - 75% de agregados naturais e 25% de agregado siderúrgico 82
4.3 Mistura 03 - 50% de agregados naturais e 50% de agregado siderúrgico 88
4.4 Mistura 04 - 25% de agregados naturais e 75% de agregado siderúrgico 94
4.5 Mistura 05 - 100% de agregado siderúrgico 100
4.6 Análise comparativa dos resultados 102
4.6.1 Resultados ensaio Marshall 105
4.6.2 Resultados ensaio de compressão diametral 108
4.6.3 Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência 109
5 CONCLUSÃO 112
5.1 Sugestões para trabalhos futuros 113
REFERÊNCIAS 114

1 INTRODUÇÃO

Existe hoje uma grande preocupação com a degradação do meio ambiente, visto que os recursos naturais disponíveis são finitos e os resíduos gerados devem ter uma destinação correta, a fim de minimizar os impactos negativos na natureza. A dependência dos recursos naturais no setor de obras rodoviárias é inegável. Utilizam-se materiais britados em praticamente todas as camadas que formam um pavimento. Nota-se que, em pleno século XXI, ainda são usados métodos antigos na execução de novas rodovias, com os mesmos materiais e equipamentos do século passado. É preciso que os engenheiros tragam alternativas, novas tecnologias, utilizando o avanço tecnológico a favor da proteção do meio ambiente.

Em relação a isso, surge como opção no mercado a utilização do agregado siderúrgico, um material artificial proveniente do resíduo da indústria metalúrgica, que pode substituir a brita convencional na construção civil, rodoviária e ferroviária. Este material é conhecido como agregado siderúrgico, neobrita, açobrita ou acerita, dependendo da indústria geradora, a empresa *Harsco Metals* da cidade de Sapiranga, que forneceu o material desta pesquisa, utiliza a nomenclatura de neobrita.

1.1 Justificativa e relevância da pesquisa

O agregado siderúrgico possui diversas vantagens quanto às suas propriedades técnicas, entre as quais se pode citar a maior resistência à derrapagem e ao desgaste natural (BRANCO, 2004), baixo custo e maior aderência ao betume se comparado à brita convencional (SILVA *apud* BRANCO, 2004, p. 20).

Além dessas características, trata-se de um material reciclável, auxiliando assim na preservação de recursos naturais não renováveis.

Segundo Silva e Mendonça (2001) o agregado siderúrgico constitui excelente material para aplicação em camadas de pavimentação, inclusive adicionado à massa asfáltica, pois as propriedades de alta dureza e poder cimentício do material aumentam a capacidade de suporte do pavimento.

1.2 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é verificar as propriedades de misturas asfálticas realizadas com a escória de aciaria de forno elétrico, a fim de demonstrar que o agregado siderúrgico pode ser um substituto à brita natural, sendo uma alternativa viável tanto no campo ambiental quanto econômico.

1.3 Objetivos específicos

Para realização deste estudo foi necessário definir em laboratório as propriedades do agregado siderúrgico antes de adicioná-lo às misturas asfálticas, bem como analisar o comportamento da mistura asfáltica com o uso do agregado siderúrgico.

Os objetivos específicos são:

- Analisar as propriedades da escória de aciaria (agregado siderúrgico), tais como granulometria, absorção de água e o desgaste à abrasão “Los Angeles”;
- Analisar o comportamento de misturas asfálticas elaboradas com diferentes percentuais de agregado siderúrgico (25%, 50% e 75%) através do método Marshall, em corpos de prova com porcentagens de 4,0, 4,5, 5,0, 5,5 e 6,0% de ligante asfáltico, verificando propriedades como o teor ideal de projeto, volume de vazios, estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração por compressão diametral e o seu módulo de resiliência;

- Comparar os resultados obtidos aos ensaios realizados com misturas convencionais de mesmo ligante com agregado pétreo, analisando e comparando também a outros trabalhos e pesquisas realizadas com o agregado siderúrgico.

1.4 Delimitação do trabalho

Este estudo estará limitado à escória de aciaria proveniente de forno elétrico e comercializada pela indústria siderúrgica *Harsco Metals* de Sapucaia do Sul/RS, não sendo aplicável a escórias comercializadas por outras indústrias, pois o tipo de forno utilizado no beneficiamento do aço, a matéria-prima utilizada, o resfriamento do rejeito e a especificação do aço produzido fazem com que a composição da escória se torne diferente.

1.5 Estrutura do trabalho

Este estudo se divide em 5 capítulos, sendo que no primeiro capítulo estão os objetivos desta pesquisa, sua importância e limitações, com uma breve introdução ao tema estudado. No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica referente a execução da pavimentação asfáltica, a elaboração de misturas asfálticas e os tipos de agregados existentes (naturais e siderúrgicos). No terceiro capítulo estão expostos os materiais que foram utilizados no trabalho, os procedimentos de laboratório e as normas que foram seguidas na moldagem e execução dos ensaios nos corpos de prova deste estudo. No capítulo 4 estão expressos os resultados obtidos, primeiramente separados por mistura e posteriormente comparados entre eles, onde os mesmos são discutidos e confrontados a outros autores. No quinto e último capítulo estão as conclusões obtidas neste estudo e sugestões para futuros trabalhos, como continuidade à presente pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o intuito de possibilitar o avanço em uma determinada área do conhecimento é necessário estar, antes de tudo, inteirado sobre o que já está materializado por outros pesquisadores e quais foram as suas limitações (VIANNA, 2001).

Este capítulo tem o objetivo de apontar referências coletadas por meio de pesquisa bibliográfica, trazendo melhor assimilação e concepção de conceitos e dos diversos usos do agregado siderúrgico na construção de obras rodoviárias.

2.1 Introdução à Pavimentação

As estradas tiveram origem na China, onde foram criadas a fim de obter um caminho melhor às suas áreas de cultivo e fontes de seus mais diversos insumos (BALBO, 2007). Portanto, nota-se que as estradas possuem importância econômica desde os primórdios da humanidade, em torno delas que surgiram novos vilarejos que no futuro formaram novas cidades.

O homem pré-histórico atendia a premissa básica do transporte visto que procurava deixar os caminhos entre sua morada e o local de caça nas melhores condições possíveis, pois tinha necessidade de deslocamento periódico (SENÇO, 2008).

Após as estradas primitivas, começaram a surgir vias com técnicas construtivas mais adequadas. Os povos romanos desenvolveram estradas com sistemas de drenagem, a fim de proporcionar maior vida útil (BALBO, 2007). Este avanço acabou se estendendo para todo o continente europeu.

Segundo Senço (2008), a evolução das estradas trouxe consigo a evolução dos meios de transportes terrestres, desde a condução de animais até a invenção da roda, acoplando ao animal um veículo rústico. Depois do século XVIII já surgiram estradas com traçado definido, revestidas com algum pavimento, adequada aos novos tipos de veículos. As estradas começaram a ligar países e territórios comerciais e os caminhos ficaram cada vez mais distantes. O desgaste das estradas já era um fator imprescindível, portanto, a fim de solucionar este problema, começou-se a revestir os leitos com algum tipo de pavimento, proporcionando estabilidade ao solo.

As rodovias no Brasil começaram a se desenvolver a partir dos anos 50, graças ao intercâmbio entre Brasil e Estados Unidos nessa área (DNIT, 2006). Nos dias de hoje, as rodovias brasileiras, segundo pesquisa da CNT (Confederação Nacional do Transporte) (2015), são constituídas por aproximadamente 1.720.643,20 km de extensão, sendo que destes, 210.618,80 km estão pavimentados. Estudos publicados pela CNT (2014) apontam que o Brasil está entre os oito maiores países em dimensão territorial do mundo, levando em conta tanto países desenvolvidos quanto em desenvolvimento, porém possui a menor densidade de malha rodoviária pavimentada, conforme indica a Tabela 1.

Tabela 1 - Densidade de malha rodoviária pavimentada em alguns países

PAÍS	**Km DE RODOVIAS A CADA 1.000,00 Km²**
EUA	438,10
China	359,90
Argentina	83,20
Rússia	54,30
Austrália	46,00
Canadá	41,60
Brasil	23,90

Fonte: CNT (2014).

Aliado a baixa densidade rodoviária comparada a outros países, o mesmo estudo mostra que o Brasil também apresenta problemas relacionados à qualidade das vias pavimentadas, onde, entre 140 países analisados, encontra-se ranqueado na 122ª posição, última colocação entre os países da América do Sul. Esta avaliação

utilizou notas variando entre 1 para as piores rodovias do mundo até 7 para as melhores, sendo que o Brasil obteve a nota 2,8.

A qualidade e a vida útil de uma rodovia estão ligadas ao seu método construtivo. Uma rodovia deve suportar as intempéries climáticas, precisa ter uma estrutura forte e permitir o escoamento das águas (DNIT, 2006).

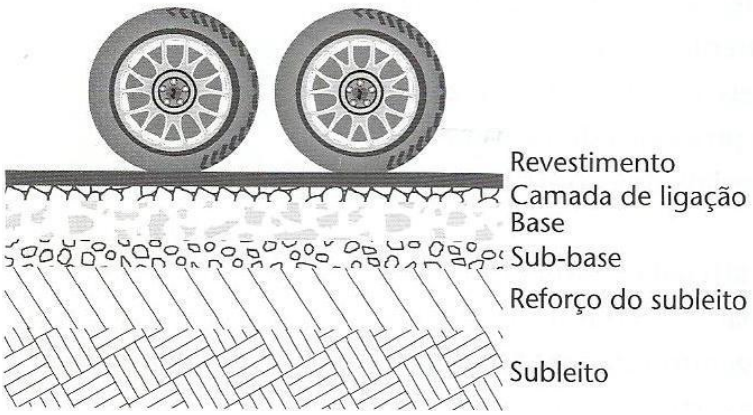
2.2 As camadas dos pavimentos

Segundo Silva (2008), o pavimento é uma estrutura executada sobre um solo de fundação (subleito), que deverá suportar atuação das cargas das rodas e as intempéries climáticas.

Para Balbo (2007), pavimento é constituído de camadas sobrepostas de materiais distintos compactados sobre o subleito da estrada, atendendo tanto operacional quanto estruturalmente ao tráfego (FIGURA 1).

Para atender aos fatores de resistência, segurança e conforto, a estrutura do pavimento é particularmente importante, pois as camadas distribuem as solicitações de carga, limitando as tensões e as deformações, de forma a garantir um desempenho adequado da via por maior tempo possível (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 1 - Camadas genéricas de um pavimento asfáltico



Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

2.2.1 Subleito

Subleito é a fundação do pavimento. Em caso de camada infinita, deve ser considerado subleito somente a camada mais próxima da superfície, pois conforme mais se aprofunda no solo, menor é a pressão aplicada, chegando ao ponto de se tornar desprezível (SENÇO, 2008).

2.2.2 Reforço de Subleito

Segundo Balbo (2007), reforço de subleito é uma camada de maciço com melhores características, que atuará fazendo com que o subleito mais profundo receba menos pressão. Sua execução não é obrigatória, pois em caso de maior espessura nas camadas acima, a pressão também seria reduzida até chegar ao subleito.

2.2.3 Base e Sub-base

Para Senço (2008), a camada de base deve suportar as cargas verticais do tráfego e distribui-las. A sub-base deve possuir características superiores às do subleito, e a base deve possuir qualidade maior que a sub-base.

A base pode ser composta por solos estabilizados naturalmente ou com mistura de agregados ou ligantes hidráulicos, pode ser também utilizada brita graduada ou brita graduada tratada com cimento (BALBO, 2007).

2.2.4 Imprimação e pintura de ligação

A norma DNER 306/97 especifica que imprimação é a aplicação de material sobre a base, quando a camada de base estiver concluída, antes da aplicação do revestimento e tem como função principal impermeabilizar, dar maior coesão superficial e permitir que o revestimento quando aplicado tenha maior aderência com a base.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o material utilizado na imprimação é asfalto diluído. Existem dois tipos de asfalto diluído, cura média (CM) e de cura rápida (CR), e estes termos referem-se à velocidade que o solvente evapora. A cura rápida tem como solvente a gasolina ou a nafta e a cura média tem como solvente o querosene.

Conforme a norma DNER 307/97, a pintura ou camada de ligação promoverá a aderência entre as duas camadas, com a aplicação de ligante asfáltico sobre a base concluída (FIGURA 2).

Figura 2 – Aplicação de camada de ligação

Fonte: Autor, 2017.

Bernucci *et al.* (2008) relata que a pintura de ligação é executada com emulsão asfáltica e no Brasil são denominadas em função do tempo para que ocorra a ruptura, que pode ser ruptura lenta (RL), ruptura média (RM) ou ruptura rápida (RR). A emulsão utilizada em maior escala é o RR-1C sendo uma emulsão de ruptura rápida, com teor de viscosidade 1 e carga iônica denominada como catiônica C.

As normas DNER 306/97 e 307/97 especificam que o ligante betuminoso não pode ser aplicado caso a temperatura ambiente esteja menor que 10ºC, ou então em dias chuvosos, também frisa que toda carga de ligante betuminoso deve possuir certificado de análise, com informações sobre o produto entregue.

2.2.5 Revestimento

Segundo Silva (2008) o revestimento deve impermeabilizar o pavimento, elevando sua resistência a possíveis derrapagens, oferecer conforto aos usuários e suportar as cargas oriundas do tráfego e das intempéries climáticas.

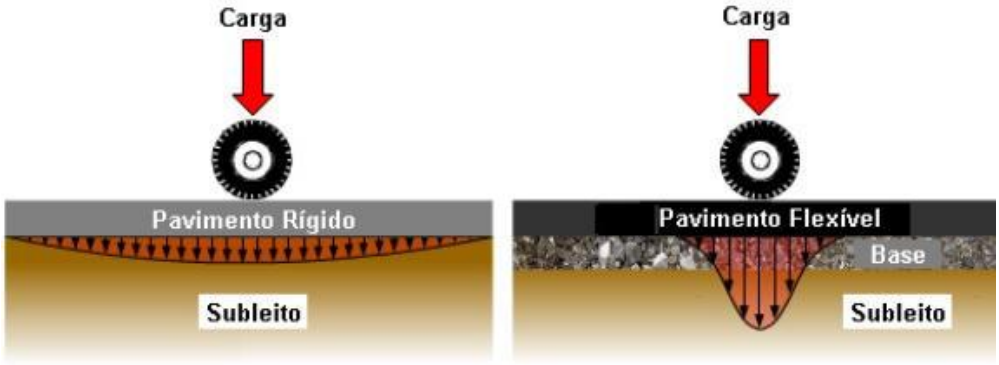
Para Balbo (2007) o revestimento precisa ser composto por materiais com grande aglutinação, a fim de conter movimentações horizontais que causariam desagregação dos componentes e diminuição de compactação. O revestimento não pode admitir altas deformações, sejam elas elásticas ou plásticas.

2.3 Tipos de Pavimentos

As obras em rodovias podem ser classificadas em dois grandes grupos, as que possuem revestimento de asfalto são nomeados de pavimento flexível e as que possuem revestimento de concreto são chamadas de pavimento rígido (SILVA, 2008).

Para Balbo (2007), os conceitos de rígido e flexível não podem ser usados observando somente a camada de revestimento, deve ser observado como o pavimento irá se comportar com a atuação dos esforços externos, o autor sugere o uso das expressões pavimento asfáltico e pavimento de concreto (FIGURA 3).

Figura 3 - Distribuição das cargas em pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: Araújo *et al.*, 2016.

2.3.1 Pavimentos de Concreto - Definição

Segundo Senço (2008) pavimentos de concreto são aqueles revestidos de concreto de cimento. Este tipo de pavimento possui alta rigidez em relação as suas camadas inferiores, desta forma consegue absorver quase todas as tensões das cargas aplicadas (DNIT, 2006). Para Loturco (2005) os pavimentos de concreto apresentam maior durabilidade e resistência, consequentemente apresentando maior vida útil.

2.3.2 Pavimentos Asfálticos - Definição

Segundo Senço (2008) pavimentos asfálticos são aqueles constituídos de revestimento betuminoso (asfalto), sendo este o pavimento preferido por projetistas e construtores. Os pavimentos asfálticos são compostos por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (BERNUCCI *et al.*, 2008)

Os pavimentos flexíveis são compostos por uma ou mais camadas que, ao serem submetidas aos esforços provenientes de um determinado carregamento, sofrem deformação elástica significativa. Sua estrutura geralmente é constituída por um revestimento que pode ser betuminoso ou de calçamento em pedras irregulares ou blocos regulares, assentes sobre base e sub-base flexíveis estabilizadas granulometricamente, ou por meio de adição de aditivos como cimento, cal e/ou betume, assentes sobre subleito ou reforço de subleito construído (DNIT, 2006).

Segundo Bernucci *et al.* (2008) os motivos para que o asfalto seja a opção mais utilizada na pavimentação é a grande união dos agregados, a impermeabilização e a resistência à maioria dos ácidos, dos álcalis e sais. Nakamura (2011) relata que o revestimento de asfalto é o mais utilizado para construção de vias. Dados da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (Abeda) mostram que mais de 90% das estradas pavimentadas nacionais são de revestimento asfáltico.

O material de revestimento utilizado na execução de pavimentos asfálticos é o CBUQ (concreto betuminoso usinado quente), que, segundo Balbo (2007), é uma

combinação equalizada de agregados e de ligante asfáltico, produzida em usina misturadora a quente.

Segundo Bernucci *et al.* (2008) o CBUQ é a mistura de agregados de diversas dimensões e cimento asfáltico, aquecidos em temperaturas já definidas, em função da propriedade do ligante, a viscosidade-temperatura. Ainda segundo a autora, as misturas asfálticas a quente são classificadas em grupos específicos levando em consideração a granulometria dos agregados.

As misturas asfálticas estão classificadas em três tipos diferentes de graduação, podendo ser de graduação densa, onde os agregados de tamanho menor ocupam os vazios dos maiores, deixando com poucos vazios e formando uma curva granulométrica contínua e bem-graduada (Ex.: concreto asfáltico - CA), graduação aberta, onde os agregados de mesma dimensão, com poucos materiais finos, o que ocasiona um aumento do volume de vazios com o ar, proporcionando a drenagem da água dentro mistura asfáltica (Ex.: camada porosa de atrito - CPA), ou graduação descontínua onde a mistura possui maior número de grãos de dimensões maiores em relação aos de dimensões intermediárias, com pouca quantidade de finos, fazendo com que os agregados graúdos tenham um maior contato (Ex.: matriz pétrea asfáltica – *stone matrix asphalt* SMA) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Balbo (2007) dosagem de mistura asfáltica é a técnica de elaborar uma disposição granulométrica de agregados diversos e CAP, objetivando que, depois de compactada, possa obter características mecânicas suficientes para suporte das cargas de um determinado pavimento.

O ligante asfáltico no Brasil é chamado de cimento asfáltico de petróleo (CAP) e segundo Bernucci *et al.* (2008) é um produto semi-sólido quando está em baixas temperaturas, viscoelástico quando encontra-se à temperatura ambiente e, quando em altas temperaturas é um produto líquido. O CAP é produzido durante o refinamento do petróleo cru e apresenta grande volume de betume na sua composição que atua como ligante (BALBO, 2007). Podem ser utilizados três tipos de cimento asfáltico de petróleo nas misturas asfálticas, classificados conforme sua penetração, podendo ser CAP-30/45, CAP-50/70 ou CAP-85/100 (DNIT 031, 2006). Estes índices são determinados através de ensaio de penetração que afere a dureza

do cimento asfáltico, onde um pistão penetra em um determinado corpo de prova e quanto mais duro for o CAP, menor será a penetração (BALBO, 2007).

Bernucci *et al.* (2008) relata que o teor de projeto de ligante asfáltico muda conforme a forma de dosagem, conforme a energia de compactação aplicada, tipo de mistura, clima local e etc.. Segundo a autora o método de dosagem mais utilizado no mundo é chamado de método Marshall, em alusão ao engenheiro Bruce Marshall que o criou na década de 40.

Os parâmetros de dosagem dependem de fatores como tipo de mistura, equipamentos disponíveis e costumes locais, porém o correto é que sejam realizados ensaios laboratoriais para que se encontre a melhor faixa granulométrica para os diversos processos de depreciação do material (BALBO, 2007).

2.4 Os Agregados

Na engenharia civil os agregados são materiais inertes, sem forma e sem dimensões definidas, que possuem características adequadas na formação de camadas ou misturas para ser utilizadas em diferentes tipos de obras. Nos serviços de pavimentação, os agregados são empregados em misturas betuminosas, base de pavimentos, entre outros (SENÇO, 2008).

Segundo Balbo (2007), agregados são aglomerados de grãos minerais de diferentes dimensões. Na pavimentação são empregados nas camadas que compõem o pavimento, e dependendo da camada a ser utilizado, deve conter determinada durabilidade, resistência e adesividade.

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), todos os revestimentos asfálticos são formados por uma combinação de ligantes asfálticos e agregados, e para saber o comportamento de cada agregado deve-se atentar à sua formação geológica. A autora também comenta que o agregado que será utilizado em uma determinada camada precisa possuir as características necessárias para resistir às cargas da superfície e do interior do pavimento. O desempenho de cada agregado depende da forma que o mesmo é produzido e sob quais condições ele irá atuar.

2.4.1 Classificação quanto à origem dos agregados

Quanto à origem dos agregados, Balbo (2007) e Senço (2008) classificam em naturais ou artificiais.

- Agregados naturais: são todos os disponíveis na crosta terrestre, sendo consequência dos mais variados fenômenos geológicos (FIGURA 4). Podem ser utilizados em sua forma natural ou podem passar por diversos processos de britagem (BALBO, 2007).

Figura 4 - Exemplo de agregados naturais - seixos

Fonte: Autor, 2017.

- Agregados artificais: Para Bernucci *et al.* (2008) e Balbo (2007) são rejeitos de processos industriais. Já segundo Senço (2008), artificiais são os agregados que precisam ser produzidos, para então obterem as características necessárias para atender as obras de engenharia (FIGURA 5).

Figura 5 - Exemplo de agregado artificial - Agregado Siderúrgico

Fonte: Oliveira, 2010.

No grupo de agregados artificiais, destaca-se o agregado siderúrgico, tema deste trabalho de conclusão, conforme apresentado no item 2.5.

2.4.2 Classificação quanto ao tamanho

Quanto ao tamanho e para uso em misturas asfálticas, os agregados são classificados como: graúdo, miúdo e material de enchimento (DNIT 031/2006 – ES):

- Agregado graúdo: material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido até a peneira 10. Exemplos: britas, cascalhos e seixos.
- Agregado miúdo: material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm, ou seja, retido até a peneira 200, porém passante na peneira 10. Exemplos: areias e pó de pedra.
- Agregado de material de enchimento (fíler): neste material pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, passante na peneira de 200. Exemplos: cal hidratada e cimento Portland.

2.4.3 Classificação quanto à granulometria

A norma DNER 035/95 aponta as dimensões nominais das peneiras. O arranjo granulométrico dos agregados é uma das características físicas mais

importantes, pois esta graduação contribui para a definição do tipo de mistura asfáltica (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A norma DNER 083/98 especifica a técnica de classificação por peneiramento (TABELA 2) e os resultados são expressos através de gráficos (FIGURA 6).

Tabela 2 - Dimensões nominais das peneiras

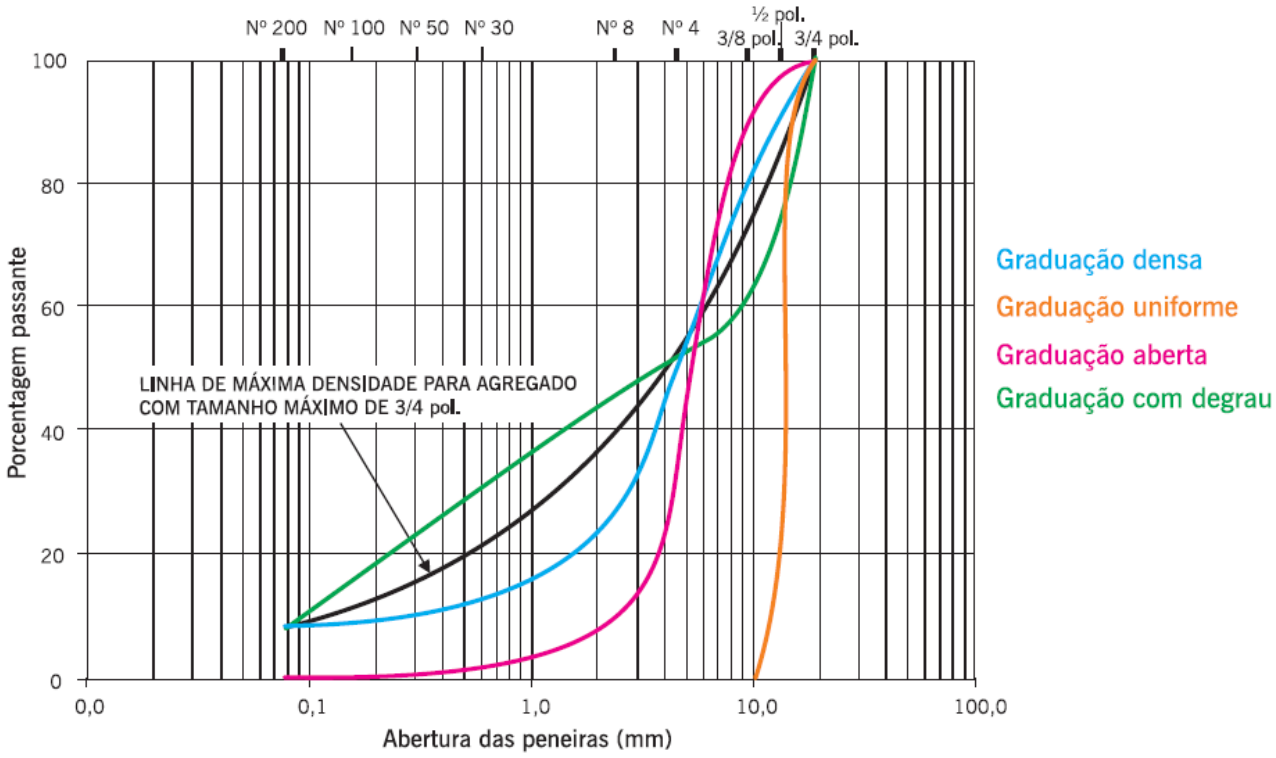
Nº PENEIRA	**ABERTURA DA PENEIRA**	
	mm	**Pol**
	75	3
	50	2
	37,5	1,5
	25	1
	19	0,75
	9,5	0,375
4	4,75	0,187
8	2,36	0,0937
10	2	0,0789
16	1,18	0,0469
30	0,6	0,0234
40	0,425	0,0168
50	0,3	0,0117
100	0,15	0,0059
200	0,075	0,0029

Fonte: Norma DNER 035/95.

- Graduação densa ou bem-graduada: tem uma constante e regular distribuição granulométrica, praticamente na densidade máxima;
- Graduação aberta: também possui uma constante e regular distribuição granulométrica, mas com escassez de material fino que preencheria os vazios entre os componentes maiores, ocasionando um volume de vazios maior;
- Graduação uniforme: possui a maior parte das partículas com tamanhos em uma faixa restrita e sua curva granulométrica é íngreme;

- Graduação com degrau ou descontínua: materiais com poucos agregados de tamanho médio, o que ocasiona uma curva granulométrica intermediária. Este tipo de agregado precisa sofrer ajustes adequados para adicioná-lo em misturas asfálticas, pois se segregam facilmente.

Figura 6 - Gráfico convencional das curvas granulométricas



Fonte: Bernucci *et al.*, 2008

2.5 O agregado siderúrgico

Por definição, o agregado siderúrgico é um material composto de óxidos e silicatos, produzido a partir do beneficiamento da escória do aço (RAMOS, 2016).

A escória é um subproduto proveniente da indústria siderúrgica, e é gerada através da fundição de metais ou da redução de minérios que tem como finalidade a obtenção do ferro gusa líquido e do aço sucessivamente. Segundo o conceito definido na NBR 5019/82, “escória é um produto líquido ou pastoso, produzido durante operações piro metalúrgicas, geralmente contendo sílica, que se torna sólido à temperatura ambiente”.

A Norma ABNT NBR 10004 /2004 (Resíduos Sólidos – Classificação), especifica que “resíduos são materiais decorrentes de atividades antrópicas, gerados como sobras de processos ou aqueles que não possam ser utilizados com a finalidade para as quais foram originalmente produzidos”. Dados do Instituto Aço Brasil mostram que, em 2015, o Brasil produziu 33,2 milhões de toneladas de aço bruto. Segundo Branco (2004), no Brasil cada tonelada de aço produz uma média de 120 kg de escória de aciaria, e analisando este dado, estima-se que a partir do material produzido, foi gerado cerca de 4 milhões de toneladas de escória de aciaria no Brasil no ano de 2015. Conforme a Tabela 3 é possível verificar um decréscimo na produção do aço na América Latina, comparando períodos de 2015 com 2016.

Tabela 3 – Produção de aço bruto da América Latina (unid: 10^3 t)

Países	**Janeiro à Março**		**16/15**	**Março**		**16/15**
	2016	**2015**	**%**	**2016**	**2015**	**%**
Brasil	7.391	8.431	-12,3	2.506	2.768	-9,5
México	4.310	4.672	-7,7	1.480	1.558	-5
Argentina	986	1.193	-17,4	318	430	-26
Colômbia	365	252	44,8	144	92	56,5
Chile	306	276	10,9	105	83	26,5
Peru	245	260	-5,8	93	92	1,1
Equador	146	155	-5,8	50	56	-10,7
América Central	108	105	2,9	37	36	2,8
Venezuela	99	443	-77,7	22	170	-87,1
Cuba	59	58	1,7	28	27	3,7
Trinidad-Tobago	36	108	-66,7	0	37	-100
Uruguai	15	15	0	7	7	0
Paraguai	8	7	14,3	4	3	33,3
Total	14.074	15.975	-11,9	4.794	5.359	-10,5

Fonte: Instituto Aço Brasil, 2016.

2.5.1 A produção do agregado siderúrgico

Branco (2004) especifica que o agregado siderúrgico é proveniente da escória, sendo esta produzida em fornos elétricos ou conversores à oxigênio LD (*Linz-Donawitz*). Para este estudo será utilizada a escória proveniente de aciaria elétrica da Empresa *Harsco Metals* da cidade de Sapiranga/RS, conforme descrito no capítulo 3 deste trabalho.

As escórias são produzidas através do processamento da sucata ou dos minérios (FIGURA 7) e são o resultado de reações ocorridas durante o processo de beneficiamento do aço. Segundo Geyer (2001), neste processo de beneficiamento a escória é o material com maior volume de geração, mais de 60,0% dos resíduos produzidos.

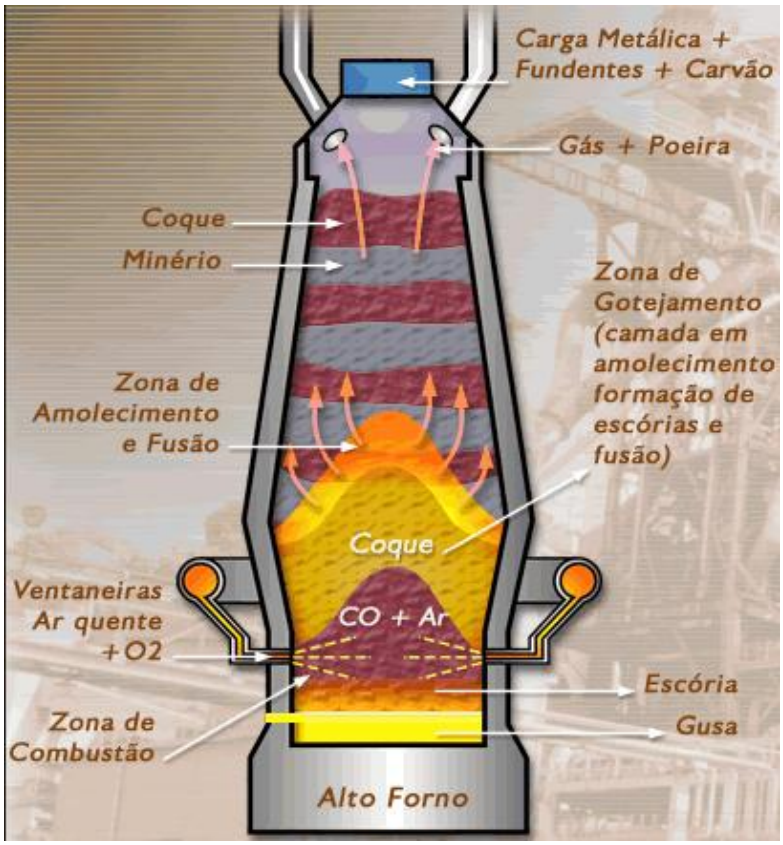
Figura 7 - Matéria prima da escória (sucata)

Fonte: Branco, 2004.

Segundo Branco (2004), as escórias siderúrgicas que são produzidas em maior escala são:

- Escória de Alto-forno: é obtida através da fusão que reduz os minérios, até obter ferro gusa direto do alto-forno. Na maioria das vezes possui um alto teor de carbono e diversas impurezas (FIGURA 8);

Figura 8 - Esquema de produção da escória de alto-forno



Fonte: CLAÚDIO, PALARETO, 2013.

- Escória de Aciaria: Conforme norma DNER-PRO 263 (1994) - Emprego de escórias de aciaria para pavimentos rodoviários, este tipo de escória é produzida em fornos elétricos durante a transformação da sucata em aço (FIGURA 9). É um material líquido, solidificando-se após resfriamento a temperatura ambiente (BRANCO, 2004).

Figura 9 - Produção da escória em forno elétrico

Fonte: Branco, 2004.

No processo de produção do aço é suprimido carbono, óxido de cálcio (CaO) e os íons de alumínio, silício e fósforo, pois estes elementos fazem com o que aço seja quebradiço e frágil, dificultando sua transformação em barras. Estes elementos que foram suprimidos, que não servem para fabricar barras de aço, fazem parte da formação da escória, e entre eles estão o óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), entre outros (BRANCO, 2004).

A escória proveniente de forno elétrico é mais homogênea que as demais escórias produzidas por outros métodos ou fornos (MOURA, 2000) e possui composição química conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química da escória de aciaria elétrica em diferentes países

COMPOSTO	BRASIL (%)	EUA (%)	JAPÃO (%)	ITÁLIA (%)	ALEMANHA (%)
CaO	33	41	40	41	32
SiO_2	18	17	25	14	15
Al_2O_3	6	8	5	7	4
FeO	30	18	19	20	31
MgO	10	10	4	8	10
MnO	5	4	7	6	4
TiO_2	-	0,2	0,06	0,1	0,1
P_2O_5	-	0,6	-	0,9	1,4

Fonte: Adaptado pelo autor de GEYER e*t al,* 1994.

Moura (2000) diz que os altos teores de óxidos de cálcio e magnésio formam um composto expansivo ao se hidratarem e este fenômeno de expansão se não tratado causará defeitos nos pavimentos executados com escória. Visto isso, verifica-se a importância da cura adequada da escória antes da comercialização do agregado, conforme será relatado no item 2.5.2.

Logo após sair do forno a escória é basculhada a céu aberto (FIGURA 10), onde então é resfriada (FIGURA 11) e processada em uma planta de beneficiamento.

Figura 10 - Basculamento da escória

Fonte: Sousa, 2007.

Figura 11 - Resfriamento da escória após basculamento

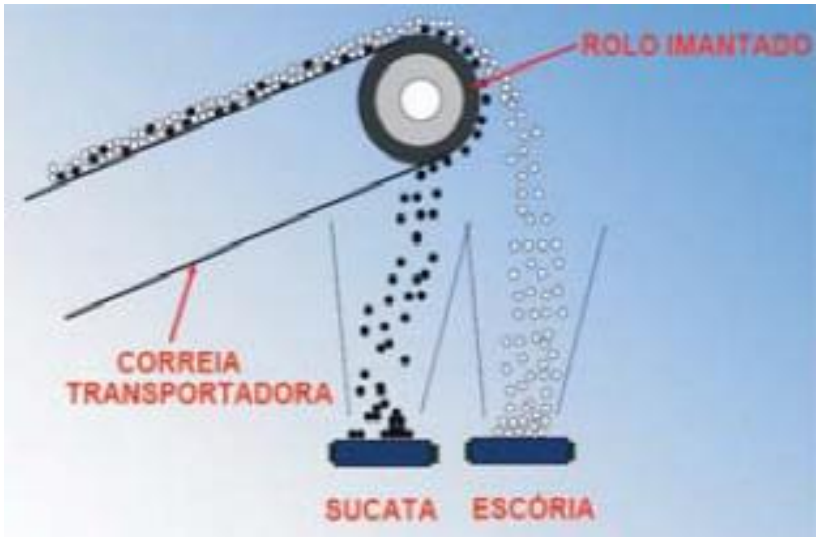
Fonte: Sousa, 2007.

No processo de beneficiamento é realizado o peneiramento e a passagem de um rolo imantado em todo o material (FIGURA 12), para que aconteça a separação magnética dos metais e da escória (FIGURA 13), sendo removido o máximo possível dos metais. Após a imantação é conduzido até uma britagem, rebritagem e, sequentemente, ao peneiramento final, resultando em granulometrias variadas. (BRANCO, 2004).

Figura 12 – Rolo imantado para separação magnética metal/escória

Fonte: MultiServ – Harsco Corporation, 2005.

Figura 13 – Processo de separação magnética metal/escória



Fonte: Sousa, 2007.

A escória, depois de beneficiada, deve ser disposta em pilhas para que aconteça a cura do material. Esta cura tem como objetivo a estabilização volumétrica, visto que o agregado possui CaO e MgO livres na sua composição que

durante suas reações de hidratação acabam expandindo a escória afetando também a granulometria deste material. A cura deve ter um prazo mínimo de 06 (seis) meses e, durante este período, é necessário que se faça uma molhagem diária das pilhas, com um caminhão pipa apropriado (RODRIGUES, 2007). Branco (2004) especifica que ao final deste processo a escória deve ser armazenada em grupos granulométricos.

2.5.2 A expansibilidade do agregado siderúrgico

É importante que as empresas produtoras da escória façam um monitoramento da expansão volumétrica, através de ensaios antes da sua comercialização. A expansão é a que mais ocasiona problemas em pavimentos que são executados com escória de aciaria, pois essa expansão pode atingir até 10,0%, resultando em erupções do pavimento (FIGURA 14), sendo que tais erupções chegam a até 10 cm de altura (SILVA e MENDONÇA, 2001). Visto isso, percebe-se a importância da cura do material, para que aconteça a estabilização de volume.

Figura 14 - Pavimento com erupção por expansão da escória

Fonte: Silva *apud* Branco, 2004, p. 28.

Coomarasamy e Walzak *apud* Branco (2004, p. 23) verificaram que alguns pavimentos que utilizaram a escória de aciaria estavam apresentando falência precoce, em Ontário, Canadá. Com a avaliação química e morfológica de microscópios de varredura eletrônica e difração de raio-X, perceberam que houve expansão do material, ocasionando as trincas no pavimento.

Uma maneira para que se diminua de forma mais rápida essa expansão é estoca-las em pequenas pilhas, com altura entre 1,5 e 2 metros, com no máximo 10.000 toneladas pilha, para que todo o material possa ser curado (LIMA *et al*, *apud* BRANCO, 2004, p. 30).

Para que se obtenha uma cura mais rápida, segundo Geyer (2001), é preciso lançar jatos de água quente sobre a pilha de escória e posteriormente uma injeção de vapor, este processo faz com que se reduza para 20 dias o tempo de cura (FIGURA 15).

Figura 15 – Lançamento de jatos de água quente sobre a escória

Fonte: CST, 2014.

A cura em pátios a céu aberto, com controle específico de molhagem, é chamada de cura lenta ou normal. Neste processo a escória se torna sólida por resfriamento rápido, então passa por britador e é empilhada ao ar livre até a sua estabilização. Siderúrgicas de grande porte utilizam este método de cura, pois produzem grandes quantidades. Porém, como o procedimento da cura pode durar de 6 meses a 2 anos, faz com que necessitem de grandes áreas para estocagem (TAVARES, 2012).

A norma DNER-ER 262/94 do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Escórias de aciarias para pavimentos rodoviários) relata que a expansão da escória de aciaria deve ser no máximo 3%, porém, salienta-se que o agregado

utilizado nesta pesquisa passou pelo procedimento de cura no pátio da Empresa *Harsco Metals* de Sapiranga/RS e está livre de expansão volumétrica. A Empresa não fornece laudos quanto a esta informação e o controle é realizado através de registros internos.

2.5.3 O fator ambiental no uso do agregado siderúrgico

As escórias siderúrgicas, que antigamente eram estocadas em aterros, hoje em dia são beneficiadas e conseguem ser aplicadas em vários setores. O uso da escória colabora com a proteção dos recursos minerais não renováveis, pois pode substituir os agregados naturais oriundos da mineração de britas e outros materiais não metálicos que são removidos do meio ambiente (TAVARES, 2012). A sua utilização também propicia uma maior eficiência energética global, pois auxilia em uma completa utilização de materiais secundários produzidos pela indústria siderúrgica (BRANCO, 2004).

Segundo ArcelorMittal (2015) estudos mostram que os metais contidos na escória não interferem nas características da água em grande volume, tanto subterrânea quanto a de superfície, portanto não apresenta impacto na água potável. Contudo, em locais com água sem muito fluxo cuidados devem ser tomados, exemplo terrenos encharcados e canais rasos, devido à alcalinidade do material.

A norma ABNT NBR 10004 /2004 (Resíduos Sólidos – Classificação) classifica a escória de aço como um material Não Perigoso – Classe II, pois os metais presentes não bioacumulam no solo, não impactando a fauna e a flora. Também não há risco a saúde da população exposta ao material. A escória do aço pode ser empregada diretamente sobre o solo, com a presença de manta geotêxtil ou sem ela.

Visto isso, conclui-se que o agregado siderúrgico é uma ótima opção, do ponto de vista ambiental, para substituição dos materiais pétreos, reduzindo assim a exploração de recursos não renováveis, como a pedra britada cujo meio de extração tem grande impacto ao meio ambiente, podendo causar erosões e remoções de camada vegetal.

2.5.4 O fator econômico do agregado siderúrgico

Quando um fator qualquer afeta a economia do país acaba por refletir em toda a sociedade, principalmente nos órgãos públicos, onde há escassez de recursos para conservação e implantação de rodovias. O uso da escória é vantajoso, pois não há necessidade de perfuração e uso de dinamites na sua extração (BRANCO, 2004). Também não existe custo com trituração, o que torna o custo de produção ser menor que no caso do agregado natural, pois reflete no preço de venda do material.

O uso da escória é ótimo em vista dos resultados obtidos, como maior duração, melhor estabilidade, etc. No entanto, a desvantagem é que, por ser um material com alta densidade, pode elevar o custo do transporte em casos específicos, quando a obra for a uma distância considerável do fornecedor (LIMA *et al*, *apud* BRANCO, 2004, p. 21).

Alvarenga *apud* Branco (2004, p. 21) verificou que o custo da escória é inferior ao da brita natural, porém em seu estudo verificou que, devido ao peso da escória, o seu uso é recomendado somente para regiões no entorno da usina geradora da escória, em um raio de até 120 km de transporte por meio rodoviário.

2.5.5 A utilização da escória como agregado

O uso da escória do aço como agregado em pavimentação de estradas teve origem na Inglaterra no início do século XIX. Nos EUA, a principal utilização da escória no início do século XX, foi como lastro ferroviário. Porém, depois de muitos séculos de estudos comprovou-se que suas características e propriedades podem ser superiores aos agregados naturais quando utilizado nas camadas de base e sub-base e na composição do revestimento asfáltico (BRANCO, 2004).

Segundo Fusinato (2004) a produção das escórias em países como os Estados Unidos, a Alemanha, o Japão, a França e o Reino Unido, gira em torno de cem milhões de toneladas anuais e é utilizado em larga escala em suas rodovias. A França executa o que chamam de *grave-laitier*, uma mistura da escória com cal hidratada ou até agregados comuns, que é empregado em base e sub-base de

pavimentos. Em torno de 65,0% das estradas da França foram executadas com este material e Moura (2000) diz que 70% das escórias de aciaria elétrica geradas nos EUA são utilizadas em obras rodoviárias.

As principais aplicações da escória nos dias de hoje são:

- Base e Sub-base rodoviária;
- Drenos rodoviários;
- Cobrimento de pátios;
- Misturas asfálticas;
- Concreto;
- Gabiões;
- Aterros;
- Lastro ferroviário.

A Norma DNIT 031 (2006) e DNER 313 (1997) especifica que, em uma mistura asfáltica, pode ser considerado como agregado graúdo a pedra britada, escória, seixo rolado preferencialmente britado ou qualquer outro material que possua desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50% (DNER-ME 035), admitindo-se excepcionalmente agregados com valores maiores, no caso de terem apresentado comprovadamente desempenho satisfatório em utilização anterior.

A norma DNER–ME 262 (1994) determina que, para a utilização da escória de aciaria em pavimentação rodoviária, a escória deve possuir expansão máxima de 3%, deve estar limpa de impurezas orgânicas ou qualquer contaminação de forno ou solo, além de atender a granulometria prevista em projeto. Deve ainda, ter absorção de água entre 1 e 2%, em peso, e a densidade deve ser entre 3,00 e 3,50 g/cm^3.

A Companhia Siderúrgica Tubarão (CST, 2014) alerta para o fato de que a granulometria do agregado siderúrgico é o fator que mais influencia nas propriedades do produto, quanto mais graúdo for o material, maior resistência ele terá à compressão. Tavares (2012) diz que as características mais importantes da neobrita são a capacidade de resistir a elevadas cargas e a alta resistência ao desgaste. O autor ainda comenta que as escórias de aciaria também apresentam como propriedade a hidraulicidade, que faz com que o material torne-se mais rígido através do contato com a água. Em rodovias este processo é chamado de

cimentação ou concrecionamento, e segundo o autor, acaba por melhorar as características mecânicas da camada compactada, tornando o seu desempenho estrutural próximo das estruturas rígidas ou semi-rígidas.

Noureldin e McDaniel *apud* Branco (2004, p. 22) testaram misturas asfálticas com diferentes porcentagens de escoria de aciaria e encontraram como resultado alta estabilidade Marshall e resistência à tração. Também verificaram em campo que as misturas apresentaram boa resistência à derrapagem. Estudos realizados por Silva e Mendonça (2001) descrevem que estradas construídas com escória de aciaria em suas camadas resistiram ao trânsito pesado e tiveram vida útil de 16 anos.

Farrand e Emery (1995) realizaram estudos, em rodovias nos Estados Unidos, com o emprego da escória de aciaria como agregado em misturas asfálticas e o comportamento do pavimento foi considerado satisfatório, de resistência próxima às misturas de agregado natural. Khan e Wahhab *apud* Branco (2004, p. 24) analisaram a aplicação de escória de aciaria misturada com cal e concluíram que estes agregados quando utilizados juntos mostram alto desempenho, pois a cal, segundo os autores, apresentou boa afinidade com o betume e a escória mostrou possuir alta resistência ao esmagamento. Kandhal e Hoffman *apud* Branco (2004, p. 24) relatam que as misturas asfálticas elaboradas com agregado de escória de aciaria mostraram estabilidade Marshall até 35,0% maior que misturas asfálticas elaboradas com agregado natural.

Rohde (2002) realizou estudos sobre o emprego da escória de aciaria elétrica como agregado em obras rodoviárias, demonstrando sua maior viabilidade ambiental e econômica. A autora utilizou a faixa C do DNIT e obteve melhores condições de trabalhabilidade comparadas a outras faixas do DNIT. Com seus resultados aplicados em camada de base, foi possível verificar também que uma camada de 40 cm de brita graduada de basalto possui deformações elásticas proporcionais a uma camada de 25 cm de base com escória de aciaria elétrica, ou seja, seria possível diminuir em 15 cm a camada de base e manter a mesma característica quanto à deformação elástica.

Estudos realizados por Freitas (2007) com agregados siderúrgicos em misturas asfálticas com três tipos diferentes de ligantes asfálticos tiveram resultados

semelhantes aos obtidos utilizando os mesmos ligantes e agregado convencional. Rocha (2011) realizou dosagem de tratamento superficial duplo com agregado siderúrgico de aciaria elétrica em um trecho experimental na região de Vitória, ES. O autor analisou em campo por cerca de oito meses e como resultado obteve comportamento equivalente ao trecho executado com agregado convencional.

Na China, Zhen-Hua *et al. apud* Tavares (2012, p. 39) utilizou o agregado siderúrgico em misturas do tipo SMA com ligante local modificado e concluiu que a escória de aciaria apresentou características ótimas, satisfazendo assim os parâmetros de dosagem usuais da região. Na Turquia, Ahmedzade e Sengoz *apud* Tavares (2012, p. 39) testaram o uso de escória de aciaria em misturas asfálticas em comparação com misturas elaboradas com calcário e concluíram que as misturas com escória apresentam características mecânicas melhores do que a mistura de calcário, demonstrando boa resistência à umidade. Também na Turquia, estudos feitos por Kök e Kuloğlu *apud* Tavares (2012, p. 40) em misturas asfálticas elaboradas com agregados de escória de aciaria, verificaram que a mistura com a escória apresentou melhores resultados comparando com misturas de calcário e basalto. Através do método Marshall, com ligante convencional 100-150, obteve um teor ótimo de ligante de 5,0%.

Também na China Wu *et al. apud* Tavares (2012, p. 40) realizaram estudos com uma mistura do tipo SMA elaborada com agregado siderúrgico. O ligante asfáltico utilizado pelo autor foi PG 76-22 e a granulometria foi de 72% de escoria de aciaria, 6% de agregado miúdo de basalto, 11% de fíler de basalto e 11% de fíler mineral. Através de dosagem realizada pelo método Marshall, atingiu um teor ótimo de asfalto de 6,4%. Esta mistura foi aplicada em um trecho experimental de uma auto-estrada chinesa e durante 3 anos apresentou um bom desempenho, sem trincas aparentes.

Estudos realizados por Bagampadde *et al. apud* Branco (2004) com diferentes misturas asfálticas utilizando escória de aciaria mostraram que as misturas que utilizaram o agregado graúdo da escória, agregados fino calcário e CAP modificado com polímero tiveram maior resistência à deformação permanente e misturas elaboradas com o uso de cal e polímero mostraram ter maior resistência à umidade. A mistura asfáltica que utilizou somente escória de aciaria como agregado acabou

apresentando maior deformação permanente, sendo que, os autores acreditam que este resultado se deve ao foto da escória ter grãos muito ásperos, ocasionando maiores tensões cisalhantes nas misturas.

Hunt e Boyle *apud* Branco (2004, p. 25) avaliaram um pavimento construído com a utilização de 30,0% de escória de aciaria na mistura asfáltica, sendo este avaliado em um período de cinco anos. O pavimento teve desempenho considerado satisfatório, pois não apontou sinais de trincamento ou diminuição da resistência à derrapagem. Segundo os autores a mistura com uso de escória de aciaria elétrica apresentou maior estabilidade, pois a textura rugosa e o formato angular dos seus grãos acabam por provocar um maior intertravamento. Kehagia (2009) também estudou revestimentos feitos com escória de aciaria em estradas da Grécia e verificou que a escória evidencia maior atrito e melhor macrotextura comparando com agregados naturais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada foi a de experimentação por meio de ensaios, onde foi verificado o comportamento apresentado pelo agregado siderúrgico aplicado em misturas asfálticas, em substituição ao agregado natural. Para efeito comparativo, foram elaborados projetos de massa asfáltica com diferentes percentuais de agregado siderúrgico. Também foram determinadas em laboratório as propriedades da neobrita e do agregado natural. Os ensaios foram realizados de acordo com as características abaixo relacionadas:

- Ensaios com os agregados: determinação da massa específica, absorção de água e realização do ensaio de abrasão “Los Angeles”;
- Ensaios com as misturas asfálticas: ensaio Marshall, determinação da densidade máxima teórica, índice de vazios, estabilidade e fluência, módulo de resiliência e verificação da resistência à tração por meio de compressão diametral.

Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados neste estudo. Na caracterização dos agregados e da mistura foram adotados procedimentos que seguiram normas que estão especificadas no item 3.2 – Métodos.

3.1 Materiais

Conforme mencionado, foram elaboradas misturas asfálticas com diferentes percentuais de agregado siderúrgico. A Figura 16 mostra os materiais utilizados neste estudo, que foram a escória de aciaria elétrica, a brita 3/4'', a brita 3/8'' e o pó

de pedra, identificados com um bilhete em cada recipiente, e com uma moeda de 1 (um) real usada como parâmetro dimensional.

Figura 16 – Materiais utilizados nas duas misturas asfálticas

Fonte: Autor, 2017.

Para que se possam comparar as propriedades através de ensaios, todas as misturas foram elaboradas na mesma faixa granulométrica, Faixa C do DNIT-ES 031/2006, a qual está especificada no item 3.2 - Métodos.

3.1.1 Agregados Graúdos

O agregado siderúrgico é proveniente da empresa *Harsco Metals*, situada no município de Sapucaia do Sul, Rio Grande do Sul, que o comercializa proveniente de forno elétrico com a nomenclatura de neobrita, já tratada e livre de expansão;

Os agregados naturais são provenientes da Empresa Conpasul Construção e Serviços, de pedreira localizada na cidade de Estrela, Rio Grande do Sul.

3.1.2 Agregado Fino

O agregado fino utilizado em ambas as misturas é o pó de brita natural proveniente da pedreira da Empresa Conpasul de Estrela, Rio Grande do Sul.

A escória de aço possui bastante material fino na sua composição (vide análise granulométrica no item 3.2.1), porém não foi utilizado 100% da mistura com agregado siderúrgico (finos da escória). Tavares (2012) realizou este estudo com 100% de agregado siderúrgico e como resultado verificou que o material fino da escória acabou por absorver ligante em demasia, ocasionando em um alto teor de ligante na mistura. Noureldin e McDaniel *apud* Branco (2004) também realizaram estudo semelhante e recomendaram a troca dos finos da escória por finos de agregados naturais, para tornar menor o peso específico da mistura.

Ahmedzadea e Sengozb em artigo publicado na revista *Journal of Hazardous Materials* da Turquia em 2009, revelam que misturas asfálticas contendo 100% de escórias de aço são suscetíveis a grandes vazios na composição, relacionados à forma angular do agregado siderúrgico, o que pode gerar problemas de compactação da mistura.

3.1.3 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado é oriundo da refinaria da Petrobras Distribuidora S/A e distribuído no RS pela Greca Distribuidora de Asfaltos Ltda., sem uso de aditivos (DOPE). A Tabela 5 mostra as especificações dos diversos tipos de CAP comercializados no Brasil.

Tabela 5 – Especificações brasileiras para o cimento asfáltico de petróleo (CAP)

CARACTERÍSTICAS	**UNIDADE**	**LIMITES**			**MÉTODOS**	
		CAP 30-45	**CAP 50-70**	**CAP 85-100**	**ABNT**	**ASTM**
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	NBR 6560	D 36

Fonte: Adaptado pelo autor de Agência Nacional do Petróleo (ANP), 2005.

O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi o CAP 50-70, por ser o ligante convencional comercializado pela Petrobras no RS. Também, houve a intenção de que o projeto de mistura asfáltica deste estudo possa ser utilizado por construtoras da região, e em contato com pelo menos três construtoras do Vale do Taquari e Rio Pardo, obteve-se a informação de que o CAP 50-70 é o ligante convencional utilizado na grande maioria das obras de pavimentação, salvo exceções por exigência de clientes para utilização de ligantes modificados.

3.2 Métodos

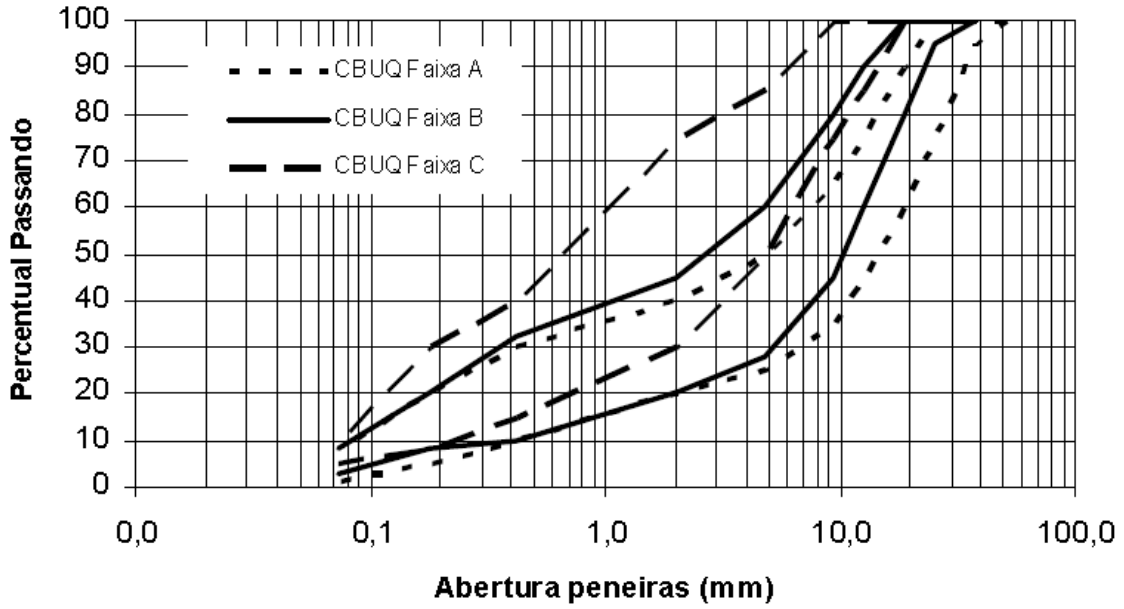
Os agregados foram separados por peneiras, para assegurar a homogeneidade da mistura, sendo que para a composição granulométrica foi utilizada a Faixa “C” do DNIT, seguindo a norma de especificação de serviço DNIT 031/2006 – ES, através do uso de planilha eletrônica, até que se enquadrasse nos requisitos da Tabela 6 e gráfico ilustrado na Figura 17.

Tabela 6 – Composição das misturas Faixas A, B e C do DNIT

PENEIRA DE MALHA QUADRADA		**% EM MASSA, PASSANDO**			
SÉRIE ASTM	**ABERTURA (mm)**	**A**	**B**	**C**	**TOLERÂNCIAS**
2”	50,8	100	- - -	- - -	- - -
1 ½”	38,1	95 - 100	100	- - -	± 7%
1”	25,4	75 - 100	95 – 100	- - -	± 7%
¾”	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½”	12,7	- - -	- - -	80 - 100	± 7%
3/8”	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
N° 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
N° 10	2	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
N° 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
N° 80	0,18	5 – 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
N° 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%

Fonte: Adaptado pelo autor com base na Norma DNIT 031/2006 – ES.

Figura 17 - Gráfico DNIT para faixas granulométricas de misturas asfálticas



Fonte: Vasconcelos, 2004.

A escolha do uso da faixa “C” DNIT se deve ao fato de ser considerada de graduação aberta e conforme sua composição granulométrica (Tabela 6) é menos densa que as faixas “A” e “B” do DNIT. Noureldin e McDaniel *apud* Branco (2004) testaram misturas asfálticas com escoria de aciaria e recomendaram o uso de misturas asfálticas mais “abertas” para obter melhor resistência à tração. Na pesquisa desenvolvida por Soares *et al.* (2000) foram testadas granulometrias nas faixas A, B e C do DNIT, sendo que as misturas na Faixa “C” indicaram maior resistência, também comprovado por Coelho e Sória *apud* Vasconcelos (2004, p. 11), que realizaram estudo comparativo entre as granulometrias das faixas B e C do DNIT, sendo que ambas as faixas demonstraram boa resistência à deformação permanente, porém a mistura de faixa B apresentou pior trabalhabilidade.

Foram elaborados 5 (cinco) projetos de massa asfáltica, buscando atender a Faixa C - DNIT, conforme percentuais da Tabela 7.

Tabela 7 - Relação dos projetos de mistura asfáltica

MISTURAS ASFÁLTICAS	AGREGADO	
	NATURAL	SIDERÚRGICO
MISTURA 01	100%	0%
MISTURA 02	75%	25%
MISTURA 03	50%	50%
MISTURA 04	25%	75%
MISTURA 05	0%	100%

Fonte: Autor, 2017.

Para cada mistura foram analisados corpos de prova utilizando teores de ligante CAP 50/70 de 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%. Para determinar o teor ideal de projeto da mistura asfáltica, foram moldados 03 (três) corpos de prova para cada percentual de ligante, seguindo a norma de método de ensaio DNER-ME 043 (1995) – Ensaio Marshall, descrito abaixo no item 3.2.5.

A execução da mistura respeitou às condições estabelecidas pela especificação e o ligante foi utilizado em uma temperatura entre 155º C e 165º C. Já os agregados superaram a temperatura do ligante entre 10º C e 15º C, porém não ultrapassando os 177º C (DNIT 031, 2006).

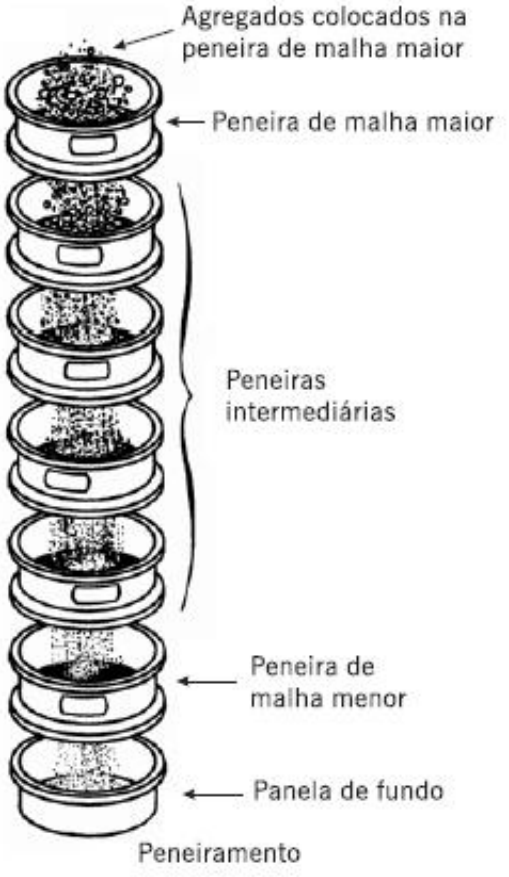
É importante determinar o teor ideal da mistura, pois, segundo Vasconcelos (2004), o pavimento pode vir a trincar ou desagregar caso a mistura possua 0,5% a menos de ligante em relação ao teor “ótimo” encontrado, e também pode exsudar ou deformar permanentemente caso tenha 0,5% de excesso de ligante. O autor também cita que, no Brasil, o teor de projeto é aquele apresentado quando se encontra 4,0% de volume de vazios na mistura, conforme norma DNIT 031 (2006) deve estar entre 3,0% a 5,0%, adotando o valor médio (4%) como ideal, sendo que este procedimento está descrito no item 3.2.8.

3.2.1 Análise granulométrica dos agregados

Este ensaio seguiu a norma de método de ensaio DNER-ME 083 (1998) – Agregados – Análise Granulométrica, onde foi realizada a separação do agregado coletado nas faixas granulométricas necessárias para o projeto.

Neste ensaio uma amostra seca de cada agregado foi distribuída em peneiras com tem suas aberturas diminuídas progressivamente, conforme Figura 18.

Figura 18 - Análise granulométrica por peneiramento



Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

A distribuição é determinada em massa como percentual de massa retida em cada peneira, sendo comparada com a massa total da amostra (BERNUCCI *et al.*, 2008), até que se atinja os percentuais desejados em projeto da faixa “C” do DNIT (TABELA 04).

Os percentuais são calculados conforme a Equação 1:

$$"\%\ que\ passa\ da\ amostra\ total" = \frac{"peso\ acumulado\ do\ material\ que\ passa"}{"amostra\ total\ seca"} \times 100 \qquad (01)$$

Primeiramente foi realizado o quarteamento de cada material, seguindo a norma DNER-PRO 199 (1996) – Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório, a fim de reduzir a massa das amostras e fazer com que a

amostra coletada realmente represente o todo. As amostras quarteadas em porções menores foram secas em estufa a 110º C e esfriadas em temperatura ambiente, sendo determinadas suas massas para início do peneiramento mecânico. O pó, por sua vez, teve que ser lavado em água, na peneira de número 200 para retirada da poeira presente, para após ser lançado nas peneiras para análise granulométrica.

3.2.2 Ensaio de Abrasão “Los Angeles” dos agregados

Segundo a norma DNER-ME 035/98 e a NBR NM 51:2001 o ensaio de abrasão “Los Angeles” é realizado para determinação da resistência à abrasão, ou seja, o quanto o agregado irá resistir quando submetido ao atrito, sendo esta característica importante para verificar a capacidade do agregado de não se alterar enquanto manuseado.

A norma DNER-ME 035/98 diz que para realizar este ensaio devem-se obedecer aos parâmetros descritos na mesma faixa granulométrica de projeto da mistura asfáltica, sendo que neste estudo é faixa “C” do DNIT. Segundo esta norma a amostra deve conter a quantidade expressa em gramas descrita na Tabela 8.

Tabela 8 – Faixas granulométricas para o Ensaio “Los Angeles”

PENEIRAS		**AMOSTRA - PESO PARCIAL EM g**		
PASSANDO	**RETIDO**	**FAIXA "A"**	**FAIXA "B"**	**FAIXA "C"**
3"	2 1/2"			
2 1/2"	2"			
2"	1 1/2"			
1 1/2"	1"	1250		
1"	3/4"	1250		
3/4"	1/2"	1250	2500	
1/2"	3/8"	1250	2500	
3/8"	1/4"			2500
1/4"	nº 4			2500
nº 4	nº 10			
Peso total da amostra em g		5000	5000	5000
Nº de rotações do tambor		500	500	500

Fonte: Adaptado pelo autor da norma DNER-ME 035/98.

Foi necessário lavar a amostra e secar em estufa, em uma temperatura que fique entre 105° C e 110° C. Após, peneirou-se para a separação conforme a fração da graduação escolhida no projeto. Então, pesou-se cada porção separadamente, obtendo o peso do material seco. Posteriormente foram agrupadas as frações de agregados e pesadas novamente para então obter o peso da amostra seca antes do ensaio.

A amostra foi colocada na máquina chamada “Los Angeles” junto a uma carga abrasiva enquanto exposta a revoluções de 30 rpm a 33 rpm. A carga abrasiva seguiu as quantidades da Tabela 9, conforme faixa de projeto definida pelo autor, sendo que neste estudo foi a faixa “C”, grifada na Tabela 9. O número de rotações do tambor obedeceu a quantidade descrita na Tabela 8, ou seja, quinhentas rotações.

Tabela 9 – Cargas abrasivas para o ensaio “Los Angeles”

FAIXA	NÚMERO DE ESFERAS	PESO TOTAL DAS ESFERAS EM g
A	12	5000
B	11	4584
C	8	3330

Fonte: Adaptado pelo autor da norma DNER-ME 035/98.

Após completar as 500 rotações, todo o material foi retirado da máquina, inclusive as esferas que foram limpas e separadas da amostra. A amostra então foi peneirada na peneira de nº 12 (1,70 mm) sendo rejeitado todo o material passante. O material retido foi colocado em estufa para secar, com temperaturas entre 105º C e 110º C durante 3 (três) horas. Passando este período retirou-se o material da estufa para esfriá-lo. A amostra foi levada à balança, sendo anotado o peso da amostra lavada e seca após o ensaio.

Para encontrar o resultado, foi seguida a Equação 2, descrita abaixo:

$$An = \frac{\mathrm{Mn} - \mathrm{M'n}}{\mathrm{Mn}} \times 100 \qquad (02)$$

Onde:

An = Abrasão “Los Angeles” da graduação *n* (com aproximação de 1%)

n = Graduação escolhida para o ensaio (A, B, C...)

Mn = Massa total da amostra seca antes do ensaio

M'n = Massa total da amostra lavada e seca após o ensaio

O DNER especifica um percentual máximo de 25,0% de degradação Los Angeles para o uso da escória de aciaria em pavimentação, porém o mesmo órgão na norma DNER – ES 313/97 fixa um limite de 40,0% para agregados graúdos em misturas asfálticas, incluindo as escórias.

Este ensaio foi realizado junto ao Laboratório de Materiais da Construção Civil (LMCC) de Santa Maria/RS.

3.2.3 Determinação da absorção e da densidade dos agregados

Para realização deste ensaio foram seguidas as especificações da norma de método de ensaio DNER-ME 081/1998 - Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo. Utilizou-se material retido na peneira de nº 4 (4,75 mm) e para ensaio da amostra, obedeceu-se a massa mínima conforme Tabela 10. O ensaio foi realizado com o agregado natural e com o agregado siderúrgico.

Tabela 10 – Massa mínima de amostra de ensaio do agregado graúdo

DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO (mm)	MASSA MÍNIMA DA AMOSTRA DE ENSAIO (kg)
12,5 (ou menor)	2,0
19	3,0
25	4,0
38	5,0
50	8,0
64	12,0
76	18,0
100	40,0
125	75,0
152	125,0

Fonte: Adaptado pelo autor da norma DNER-ME 081/1998.

Este ensaio consistiu em lavar a amostra de material na peneira de nº 4 (4,75 mm) para que saíssem todos os finos aderidos, secar em temperatura entre 105 e 110º C e resfriar em temperatura ambiente entre uma e três horas. Então, colocou-se a amostra em um recipiente com água à temperatura ambiente por 24 horas. Após este período a amostra foi removida da água e enxugada com uma toalha, removendo somente a água superficial. Após enxugar, pesou-se a amostra saturada (superficialmente seca), assim encontrando o seu peso úmido.

Em seguida levou-se um cesto vazio à imersão na água, onde o mesmo foi pesado para obter a tara do recipiente. Feito isso, a amostra foi colocada no recipiente imerso e pesada, assim encontrando o peso do recipiente cheio. Realizando a subtração do peso cheio menos a tara do recipiente se obteve o peso da amostra imersa. Por fim, a amostra foi retirada do recipiente e levada a uma estufa para secagem com temperaturas entre 105º C e 110º C e posterior repouso em temperatura ambiente entre uma e três horas. Após a secagem pesou-se novamente a amostra, obtendo então o seu peso seco.

Para cálculo, foram seguidas as Equações 3, 4 e 5, descritas abaixo:

$$D_{ap} = \frac{\mathrm{Ms}}{\mathrm{Mh-L}} \quad (03)$$

$$D_{re} = \frac{\mathrm{Ms}}{\mathrm{Ms-L}} \quad (04)$$

$$A = \frac{\mathrm{Mh-Ms}}{\mathrm{Ms}} \times 100 \quad (05)$$

Onde:

D_{ap} = Densidade aparente do agregado (em g/cm³)

Ms = Peso do agregado seco (em g)

Mh = Peso do agregado saturado com superfície seca (em g)

L = Peso do agregado imerso na água (em g)

D_{re} = Densidade real do agregado (em g/cm³)

A = Absorção do agregado (em %)

3.2.4 Ensaio Marshall para misturas asfálticas

As misturas asfálticas foram elaboradas conforme o ensaio Marshall, procedendo com a moldagem de corpos de prova segundo método de ensaio DNER-ME 043 (1995). Os agregados foram levados à estufa com temperatura entre 105º C a 110º C e após, separados em recipientes distintos, nas frações definidas pelo projeto e pesados separadamente, obtendo então o peso a ser utilizado de cada uma das frações dos materiais da mistura.

Os recipientes foram colocados em estufa, conforme norma, os agregados estavam a uma temperatura de 170º C. A especificação também cita que devem ficar aproximadamente entre 10º C e 15º C acima da temperatura de aquecimento do ligante, porém não ultrapassar os 177º C, o que foi obedecido, pois o ligante foi aquecido à uma temperatura de 160º C.

Para determinar a quantidade de ligante a ser adicionado deve-se seguir a Equação 6.

$$"Peso\ do\ ligante" = \frac{"\%\ \text{de ligante}" \times "\text{peso do CP}"}{100 - "\%\ \text{de ligante}"} \quad (06)$$

Onde:

% de ligante = Porcentagem de ligante a ser adicionada no corpo de prova

Peso do CP = Peso do corpo de prova

Conforme descrito anteriormente, neste estudo foram moldados três corpos de prova para cada teor de ligante, sendo os teores 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%, totalizando 60 corpos de prova, sendo 15 corpos de prova para cada projeto de massa asfáltica especificados na Tabela 7.

Procedeu-se, neste momento, a mistura de todos agregados com o ligante (CAP), sendo que o CAP foi aquecido em uma temperatura em torno de 160ºC. Em um recipiente aquecido foram colocadas a mistura de agregados e a quantidade de ligante aquecido, misturando em misturador mecânico, até que os agregados ficassem completamente cobertos (FIGURA 19).

Figura 19 - Realização da mistura entre agregados e ligante

Fonte: Autor, 2017.

A temperatura de compactação dos corpos de prova foi definida pela viscosidade *Saybolt Furol* do ligante, portanto todas as misturas estiveram a 140º no momento de compactá-las, sendo que as misturas aguardaram em estufa com esta temperatura por um período mínimo de duas horas.

Após terminar a etapa anterior, foi aplicado um papel filtro no fundo do molde, onde a mistura foi inserida em duas camadas iguais. Inicialmente houve a tentativa de se colocar com uma única camada, porém observou-se que os agregados distribuíam-se de forma desproporcional no molde, sendo que os agregados graúdos acabavam por se agruparem no fundo do molde. Portanto, a massa foi distribuída no molde em duas camadas iguais. Após a colocação da primeira camada aplicou-se 15 golpes manuais com haste aquecida ao redor da massa e mais 10 golpes no centro da massa, fazendo com que a ponta tocasse o fundo do molde. Para a segunda camada foram aplicados os mesmos 15 golpes manuais ao redor da massa e mais 10 golpes no centro da massa, atentando para que a haste ultrapassasse a superfície de separação com a camada inferior. Este processo foi realizado a fim de suprimir a segregação dos agregados que gerariam possíveis vazios pela superposição das partículas maiores do agregado graúdo.

Feito isso, a superfície foi emparelhada com uma espátula e foram aplicados 75 golpes com o soquete na face da amostra, utilizando o compactador mecânico de

corpos de prova para misturas asfálticas (FIGURA 20). Removeu-se, então, a placa base e o colar, invertendo o molde com a amostra e fixando-o novamente, para que fosse aplicado o mesmo número de golpes na face invertida da amostra.

Figura 20 - Compactador mecânico de corpos de prova para misturas asfálticas

Fonte: Autor, 2017.

Depois de concluída a compactação, foi removido o conjunto do fixador do molde, aguardando até que a amostra esfriasse, durante no mínimo 16 horas em temperatura ambiente, sob uma superfície lisa e plana. Este processo foi necessário para que a amostra pudesse ser removida do molde sem qualquer deformação.

Importante salientar que todos os corpos de prova obedeceram a altura de 63,5 mm, com uma margem de 1,3 mm para mais ou para menos, e, após remover o corpo de prova, todos foram identificados com líquido corretivo branco e colocados em repouso de um dia para outro em superfície nivelada para então proceder com os ensaios (FIGURA 21).

Figura 21 - Corpos de prova moldados através do Ensaio Marshall

Fonte: Autor, 2017.

3.2.5 Massa específica aparente da mistura asfáltica

Após o resfriamento, desmoldagem e repouso dos corpos de prova foram obtidas as dimensões dos mesmos, verificando seu diâmetro e sua altura. A norma de método de ensaio DNER-ME 117 (1994) determina como se obtém a massa específica aparente, ou também chamada densidade aparente da mistura asfáltica *(DAM)* em corpos de prova moldados em laboratório.

Determina-se para cada corpo de prova sua massa seca *(Ms)* e a sua massa submersa em água *(Ms_{sub})* à temperatura ambiente (ambas as massas medidas em gramas). A diferença entre seu peso seco e o peso submerso é o volume *(V)* que o corpo de prova apresenta.

Com estes valores é possível obter a densidade aparente dos corpos de prova, conforme Equação 7:

$$DAM = \frac{\mathrm{Ms}}{V} \qquad (07)$$

Onde:

DAM = Densidade aparente da mistura (em g/cm³)

Ms = Massa seca (em g)

V = volume do corpo de prova (em cm^3)

Calculou-se a densidade aparente dos três corpos de prova moldados para cada teor, totalizando 15 resultados. Para cada teor, foi feita uma média para determinação da sua densidade aparente.

3.2.6 Estabilidade e fluência Marshall

A norma DNER-ME 043/95 especifica que o ensaio de estabilidade Marshall consiste em encontrar a resistência máxima à compressão radial do corpo de prova, moldado e dosado conforme o método de dosagem Marshall. É expresso em newtons (N). Neste ensaio, a amostra foi submetida à deformação, com velocidade padrão, até o momento da ruptura, ocorrida a ruptura verificou-se qual foi a carga máxima que levou o corpo de prova ao rompimento. Também, segundo a norma DNER-ME 043/95, o ensaio de fluência Marshall é a deformação total que a amostra apresentou após aplicação de uma carga nula até carga máxima. É expressa em décimos de milímetro. É considerado como um índice de deformação da mistura ou de propriedade plástica da mesma.

Para o desenvolvimento deste ensaio foi necessário que os corpos de provas ficassem imersos em banho-maria com a água em temperatura de 60ºC durante 30 a 40 minutos (FIGURA 22).

Figura 22 - Corpos de prova em banho-maria à 60º C

Fonte: Autor, 2017.

Na sequência os corpos de prova foram colocados no molde de compressão, sendo que este se encontrava em temperatura entre 21ºC a 38ºC, limpo e com os pinos-guias lubrificados. Assim que colocados na prensa, os corpos de prova foram posicionados segundo a geratriz e o medidor de fluência foi ajustado na posição de ensaio (FIGURA 23). A norma determina que a prensa deve se elevar em uma velocidade de 5 (cinco) cm por minuto, até que o corpo de prova seja rompido, devendo então ser observado no defletômetro a indicação de um máximo. Tomou-se nota deste máximo e converteu-se em Newton (N) para Quilograma-força (Kgf) através do gráfico de calibração do anel dinamométrico. A norma ainda aponta que não se deve exceder o período de 30 segundos entre a retirada do banho-maria e o rompimento do corpo de prova, o que foi obedecido na realização do ensaio.

Figura 23 - Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall

Fonte: Autor, 2017.

A carga em N (Kgf) que levou ao rompimento da amostra foi anotada como “estabilidade lida”, sendo o valor corrigido conforme a espessura do corpo de prova, multiplicando pelo fator de correção da Tabela 11, ou então pela Equação 8, abaixo descrita.

$$f = 927{,}23\ h^{-1{,}64} \qquad (08)$$

Onde:

f = fator

h = espessura do corpo de prova

Sendo o valor obtido nesta multiplicação, o resultado da estabilidade Marshall.

Tabela 11 - Correção da estabilidade em função da espessura do corpo de prova

ESPESSURA (mm)	FATOR	ESPESSURA (cm)	FATOR	ESPESSURA (cm)	FATOR
50,8	1,47	56,3	1,22	64,3	0,98
51,0	1,45	56,6	1,21	64,7	0,97
51,2	1,44	56,8	1,20	65,1	0,96
51,6	1,43	57,12	1,19	65,6	0,95
51,8	1,42	57,4	1,18	66,1	0,94
52,0	1,41	57,7	1,17	66,7	0,93
52,2	1,40	58,1	1,16	67,1	0,92
52,4	1,39	58,4	1,15	67,5	0,91
52,6	1,38	58,7	1,14	67,9	0,90
52,9	1,37	59,0	1,13	68,3	0,89
53,1	1,36	59,3	1,12	68,8	0,88
53,3	1,35	59,7	1,11	69,3	0,87
53,5	1,34	60,0	1,10	69,9	0,86
53,8	1,33	60,3	1,09	70,3	0,85
54,0	1,32	60,6	1,08	70,8	0,84
54,2	1,31	60,9	1,07	71,4	0,83
54,5	1,30	61,1	1,06	72,2	0,82
54,7	1,29	61,4	1,05	73,0	0,81
54,9	1,28	61,9	1,04	73,5	0,80
55,1	1,27	62,3	1,03	74,0	0,79
55,4	1,26	62,7	1,02	74,6	0,78
55,6	1,25	63,1	1,01	75,4	0,77
55,8	1,24	63,5	1,00	76,2	0,76
56,1	1,23	63,9	0,99		

Fonte: Norma DNER-ME 043/95

Para este estudo utilizou-se a Tabela 11 para definir o fator de correção da estabilidade. O valor da fluência foi obtido logo após o ensaio da estabilidade, através do uso de um defletômetro, sendo os resultados da estabilidade a carga média e da fluência a média dos valores, ambos em três corpos de prova para cada teor. A fluência é expressa em 0,25mm.

3.2.7 Massa específica máxima teórica (DMT)

A massa específica máxima teórica, ou densidade máxima, foi calculada através da norma NBR 12891 (2003), referente a densidade máxima teórica da mistura (sigla DMT no Brasil), onde determinam-se as densidades reais individuais dos agregados considerando as proporções em que serão adicionados a mistura.

Para encontrar a densidade do agregado graúdo, utilizou-se a norma DNER 081/98 - Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo, e para o agregado miúdo a norma DNER-ME 84/95 - Agregado miúdo – determinação de densidade real, sendo a densidade máxima teórica da mistura calculada através da Equação 9.

$$DMT = \frac{100}{\frac{(100-\%L)}{D_M}+\frac{\%L}{D_L}} \quad (09)$$

Onde:

DMT: densidade máxima teórica (g/cm³);

%L: percentual de ligante;

DM: densidade da mistura considerando as densidades individuais de cada agregado e o percentual utilizado na mistura (g/cm³);

DL: densidade do ligante (g/cm³).

3.2.8 Volume de vazios, relação betume/vazios e teor de projeto

Segundo Bernucci (2008) dois parâmetros fundamentais no estudo de misturas asfálticas são os vazios de ar na mistura asfáltica compactada (no Brasil é chamada de volume de vazios ou V_V) e o volume de vazios nos agregados minerais *(VAM),* que representa os vazios de ar e de asfalto efetivo, descontando o asfalto já absorvido pelo agregado.

A norma de especificação de serviço DNIT 031 (2006) determina que o volume de vazios da mistura para uma camada de rolamento deve ficar entre 3 e 5% e a norma NBR 16273 (2014) mostra que o percentual de vazios é calculado através da Equação 10:

$$Vv = \frac{\mathrm{GMT-DAM}}{GMT} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

Vv: volume de vazios (em %);

GMT: densidade máxima teórica da mistura;

DAM: densidade aparente da mistura.

Para determinar o percentual de vazios do agregado mineral *(VAM)* deve ser seguida a Equação 11:

$$VAM = \mathrm{Vv} + \frac{\text{"\% asfalto"} \times \mathrm{DAM}}{\text{"}densidade\ do\ asfalto\text{"}} \quad (11)$$

Onde:

VAM: volume total de vazios formado pelo agregado (em %);

Vv: volume de vazios da mistura ocupado pelo ar (em %);

% de asfalto: porcentagem de ligante a ser adicionada na confecção do corpo de prova;

DAM: densidade aparente da mistura;

Densidade do asfalto: densidade do ligante, considerada 1,001, conforme laudo do fornecedor.

A norma DNER 043 (1995) determina que a relação betume/vazios *(RBV)* de uma mistura asfáltica para camadas de rolamento deve ficar entre 75 e 82. Determina-se a relação de betume/vazios através da Equação 12:

$$RBV = \frac{\mathrm{VAM} \times \mathrm{Vv}}{VAM} \quad (12)$$

Onde:

RBV = porcentagem de vazios do agregado mineral preenchido com ligante

VAM: volume total de vazios formado pelo agregado (em %)

Vv: volume de vazios da mistura ocupado pelo ar (em %)

A Tabela 10 foi adaptada da norma DNIT-ES 031/2006 e mostra os limites de *Vv* e *RBV* conforme a faixa granulométrica de projeto escolhida:

Tabela 12 - Limites de *Vv* e *RBV* conforme faixa granulométrica da mistura

FAIXAS	**Vv (%)**		**RBV (%)**	
	MÍN	**MÁX**	**MÍN**	**MÁX**
A (DNIT)	4	6	65	72
B e C (DNIT)	3	5	75	82

Fonte: Adaptada pelo autor da norma DNIT-ES 031/2006.

A partir do volume de pode-se então verificar o teor de projeto. Com os cinco valores médios de *Vv* obtidos nos cinco grupos de corpos de prova (4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0% de teor de ligante) traça-se um gráfico com o teor de asfalto no eixo “x”, volume de vazios no eixo “y”. Adiciona-se então uma linha de tendência para os valores encontrados no volume de vazios de cada teor e a partir da interseção da linha de tendência com a linha de 4% de *Vv* é encontrado o teor de projeto no eixo *“x”.*

3.2.9 Resistência à tração por compressão diametral

Segundo a norma DNIT 136/2010 - ME neste ensaio determina-se a resistência à tração por meio de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas, com altura entre 3,50 cm a 6,50 cm e diâmetro de 10 ± 0,2 cm.

Segundo Vasconcelos (2004), este ensaio também é conhecido como “ensaio brasileiro”, pois foi elaborado por Lobo Carneiro em 1953, para determinação da resistência à tração de corpos de prova de concreto de cimento Portland expostos às solicitações estáticas. A utilização em misturas asfálticas se deve ao fato de os revestimentos asfálticos criarem tensões de tração por flexão nas suas fibras, assim que expostos às solicitações do tráfego.

Conforme norma DNIT 136/2010 - ME foi preciso medir a altura (h) do corpo de prova com uso de um paquímetro em quatro posições diametralmente opostas, sendo adotada a média aritmética das quatro leituras de altura. Também foi medido o diâmetro *(D)* do corpo de prova com paquímetro, em três posições, sendo adotada como diâmetro a média aritmética das três leituras.

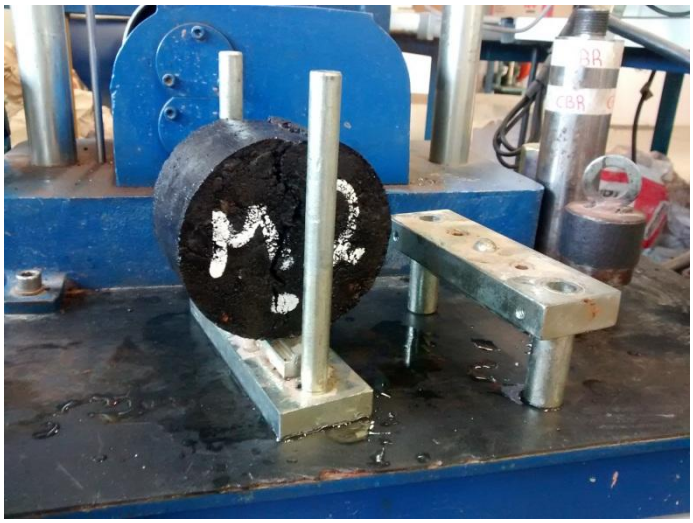
Após as leituras, e com as dimensões determinadas, o corpo de prova permaneceu por duas horas em banho maria, para obter a temperatura de ensaio, 25º C. A amostra então foi colocada sobre o prato na prensa, no sentido horizontal, conforme Figura 24, realizando ajustes nos pratos da prensa até que se tenha uma leve compressão, que mantenha o corpo de prova em posição. Aplicou-se uma carga com velocidade de deformação de 0,8 ± 0,1 mm/s até a sua ruptura,

separando em duas metades o corpo de prova, no plano diametral vertical (FIGURA 25). Neste momento verificou-se o valor da carga aplicada *(F)*.

Figura 24 - Realização do ensaio de compressão diametral

Fonte: Autor, 2017.

Figura 25 - Ruptura do corpo de prova no ensaio de compressão diametral



Fonte: Autor, 2017.

A partir do valor da força (F) obtida, é possível calcular a resistência à tração do corpo de prova rompido por compressão diametral, através da Equação 13:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\,\pi DH} \quad (13)$$

Onde:

σ_R = resistência à tração (em MPa)

F = carga de ruptura (em N)

D = diâmetro do corpo de prova (em cm)

H = altura do corpo de prova (em cm)

3.2.10 Módulo de Resiliência

A norma DNIT 135/2010-ME define módulo de resiliência de misturas betuminosas como a relação de tração, aplicada repetidamente verticalmente na amostra, e a deformação específica recuperável correspondente à carga aplicada, em uma determinada temperatura. O termo resiliência pode ser conceituado como a energia estocada em um corpo que foi elasticamente deformado, sendo que esta energia é devolvida quando cessam as cargas deformadoras (HVEEM *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008). Tavares (2012) diz que o módulo de resiliência tem como objetivo verificar as características de deformabilidade de misturas asfálticas em circunstâncias dinâmicas e no regime viscoelástico.

Segundo a norma DNIT 135/2010-ME o módulo de resiliência em misturas é a relação entre a tensão de tração (στ), aplicada diversas vezes no plano diametral vertical de corpos de prova cilíndricos e a deformação específica recuperável (τε) compatível à tensão aplicada, em determinada temperatura (T). O módulo de resiliência é determinado pela Equação 14.

$$MR = \left(\frac{\sigma_\tau}{\varepsilon_\tau}\right) T \quad (14)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência

σt = tensão de tração

εt = deformação específica recuperável

T = temperatura

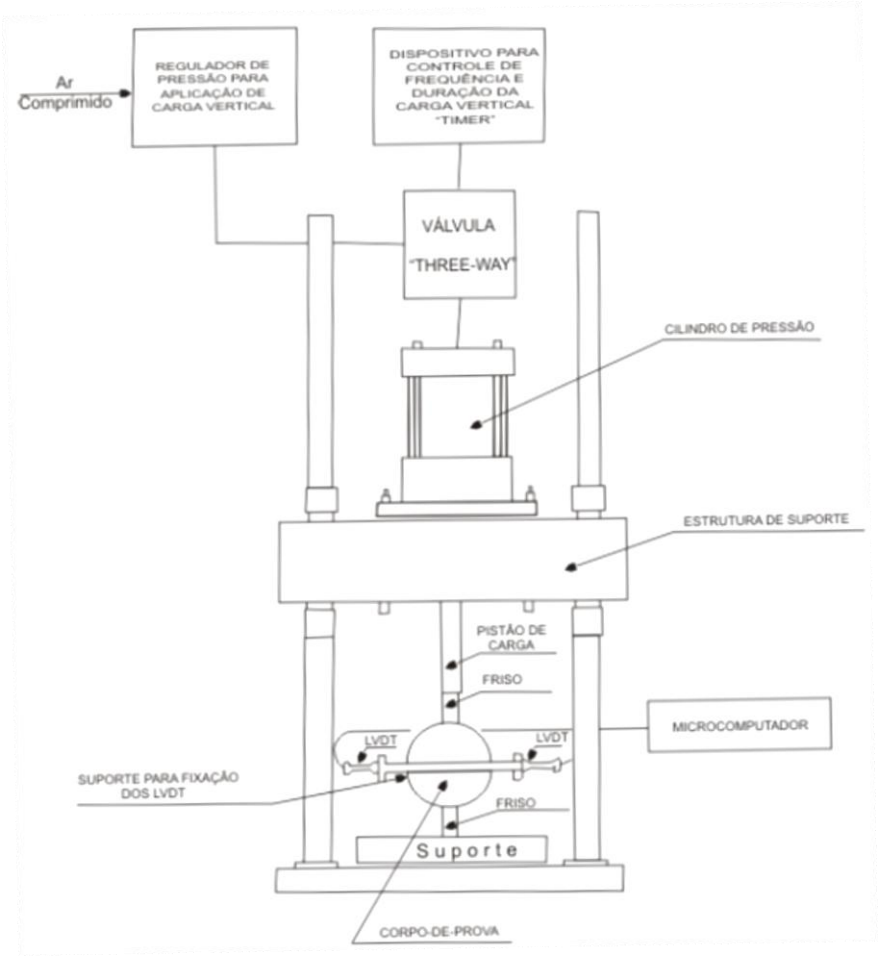
O corpo de prova foi fixado em duas de suas laterais cilíndricas, sendo inseridos entre os dois pistões apoiados entre base da prensa e o friso superior de aplicação de carga, fixando os transdutores de forma que se obtenha o registro no oscilógrafo, no início da escala linear dos mesmos, conforme Figura 26.

Figura 26 - Exemplo de fixação e aplicação de carga na determinação do módulo de resiliência

Fonte: Tavares, 2012.

Foi necessário determinar a carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, de modo a obter uma tensão de aproximadamente (nunca maior) a 30 % da resistência à tração por compressão diametral (item 3.2.10). Aplicou-se então 200 vezes uma carga vertical repetida diametralmente no corpo de prova, com frequência de aplicação da carga de 60 ciclos por minuto e duração de 0,10 segundo. Após prossegue-se a aplicação da carga mensurando a “deformação resiliente” para 500, 600 e 700 ciclos de aplicações (FIGURA 27). Os corpos de prova foram então rotacionados a 90° em relação à posição inicial, repetindo o processo e calculando a média dos eixos onde a carga foi aplicada (0° e 90°). Este carregamento pulsante tem como objetivo simular a passagem da roda dos veículos no revestimento asfáltico.

Figura 27 - Aparelho para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas



Fonte: Norma DNIT 135/2010-ME.

Considera-se como sendo o MR da mistura a média destes valores obtidos para um conjunto de no mínimo três corpos de prova, através da Equação 15.

$$MR = \frac{F}{\Delta H} \times (0{,}9976\mu + 0{,}2692) \quad (15)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (em kgf/ cm²)

F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova (em kgf)

Δ = deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para 500, 600 e 700 aplicações da carga (F) (em cm)

H = altura do corpo de prova (em cm)

μ = coeficiente de Poisson. Sugere-se o valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson.

A norma ainda comenta que o módulo de resiliência do corpo de prova ensaiado é a média aritmética dos valores determinados para aplicações de carga (F) e quando a temperatura de ensaio não for especificada, o módulo de resiliência é determinado na temperatura de 25º C com tolerância de mais ou menos 1º C.

Este ensaio foi realizado junto ao Laboratório de Materiais da Construção Civil (LMCC) de Santa Maria/RS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da elaboração das misturas asfálticas, foram realizados ensaios de absorção e resistência à abrasão (capítulos 3.2.3 e 3.2.2, respectivamente), com os agregados naturais e o siderúrgico (neobrita). O ensaio de absorção obteve os resultados constantes na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de absorção dos agregados

PARÂMETRO	BRITA 3/4''	BRITA 3/8''	NEOBRITA
Peso Superficialmente Seco	2.235,30	2.139,20	2.195,60
Peso Submerso	1.451,83	1.384,65	1.529,44
Peso Seco	2.194,81	2.099,21	2.145,20
Densidade Aparente (g/cm³)	2,801	2,782	3,220
Densidade Real (g/cm³)	2,954	2,938	3,484
Absorção (%)	1,84%	1,90%	2,35%

Fonte: Autor, 2017.

A neobrita demonstrou ter densidade e absorção maior que a brita natural, sendo que, a norma DNER–ME 262 (1994) – Escória de aciaria para pavimentos rodoviários especifica valores para a densidade entre e 3,0 a 3,5 g/cm^3 e para a absorção de água entre 1,0% a 2,0% em peso para utilização da escória como agregado em misturas asfálticas.

Nota-se que o percentual de absorção ultrapassa a especificação, porém Rohde (2002) também realizou este ensaio com a escória de forno elétrico e obteve resultados de até 2,6%, Branco (2004) encontrou 4,47% e Tavares (2012) alcançou índice de 4,7% de absorção de água para o mesmo tipo de agregado. Também, a norma DNER–ME 262 (1994) não cita qual o tipo de escória a especificação se refere, sendo que escórias de alto forno e de aciaria elétrica devem apresentar

resultados diferentes quanto à absorção de água, por possuírem composições distintas.

Acredita-se que a elevada absorção de água se deve também ao fato da alta porosidade do agregado siderúrgico, conforme se consegue notar na Figura 28. O ensaio especifica que os agregados devem ser enxugados um a um, porém pequenos poros podem manter água acumulada em seu interior, aumentando o seu peso superficialmente seco e tornando o percentual de absorção maior.

Figura 28 - Porosidade do agregado siderúrgico de aciaria elétrica

Fonte: Autor, 2017.

O ensaio de desgaste por abrasão com os agregados naturais e o agregado siderúrgico foi desenvolvido junto ao Laboratório de Materiais da Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria/RS (UFSM), sendo que o resultado para o agregado natural foi de 18,23% e da neobrita 20,03%. Estes percentuais mostram a perda por abrasão, referente à deterioração superficial dos grãos do agregado quando expostos ao atrito, sendo que a neobrita, com percentual maior, é menos resistente quando manuseada.

A norma DNER ME-262 (1994) – Escória de aciaria para pavimentos rodoviários, estabelece que o desgaste por abrasão “Los Angeles” das escórias deve ser de no máximo 25% quando utilizadas em revestimentos asfálticos, portanto os materiais deste estudo atendem à especificação. Tavares (2012) encontrou 22,4% e Branco (2004) obteve resultado de 35% para a abrasão, lembrando que a norma DNER-ES 313 (1997) – Pavimentação em concreto betuminoso, indica um

limite máximo de 40% de desgaste por abrasão para agregados graúdos, inclusive escórias.

4.1 Mistura 01 - 100% de agregados naturais

A primeira mistura asfáltica foi desenvolvida com 100% de agregados naturais, sem uso da neobrita, sendo que a composição granulométrica desta mistura está exposta na Tabela 14.

Tabela 14 - Análise granulométrica da mistura 01

PENEIRA	BRITA 3/4" % PASSANTE	BRITA 3/8" % PASSANTE	PÓ DE PEDRA % PASSANTE
3/4"	100,0	100,0	100,0
1/2"	27,6	99,2	100,0
3/8"	2,0	74,1	100,0
N° 4	0,6	6,9	99,4
N° 10	0,5	1,1	74,7
N° 40	0,5	1,1	39,0
N° 80	0,4	1,0	27,5
N° 200	0,3	0,7	14,2

Fonte: Autor, 2017.

Com o auxílio de planilha eletrônica e utilizando os resultados da análise granulométrica, foram definidos os percentuais de cada material, para que se encaixassem dentro da faixa granulométrica proposta para este estudo (Faixa C – DNIT). As Tabelas 15 e 16 mostram os resultados encontrados para a mistura 01, onde é possível verificar que foi necessário utilizar 23% de brita 3/4'', 20% de brita 3/8'' e 57% de pó de pedra para elaboração da mesma. A Figura 29 apresenta o gráfico com a curva granulométrica encaixada dentro da curva de projeto.

Tabela 15 - Cálculo dos percentuais de cada material da mistura 01 com 100% de agregados naturais

MISTURA 01 com 100% de agregados naturais				
PENEIRA	**% BRITA 3/4"** **% PASS. X FATOR**	**% BRITA 3/8"** **% PASS. X FATOR**	**% PÓ DE PEDRA** **% PASS. X FATOR**	**TOTAL DA MISTURA %**
3/4"	100,0 x 23% = 23,0	100,0 x 20% = 20,0	100,0 x 57% = 57,0	100,00
1/2"	27,6 x 23% = 6,3	99,2 x 20% = 19,8	100,0 x 57% = 57,0	83,2
3/8"	2,0 x 23% = 0,5	74,1 x 20% = 14,8	100,0 x 57% = 57,0	72,3
N° 4	0,6 x 23% = 0,1	6,9 x 20% = 1,4	99,4 x 57% = 56,6	58,2
N° 10	0,5 x 23% = 0,1	1,1 x 20% = 0,2	74,7 x 57% = 42,6	42,9
N° 40	0,5 x 23% = 0,1	1,1 x 20% = 0,2	39,0 x 57% = 22,2	22,6
N° 80	0,4 x 23% = 0,1	1,0 x 20% = 0,2	27,5 x 57% = 15,7	16,0
N° 200	0,3 x 23% = 0,1	0,7 x 20% = 0,1	14,2 x 57% = 8,1	8,3

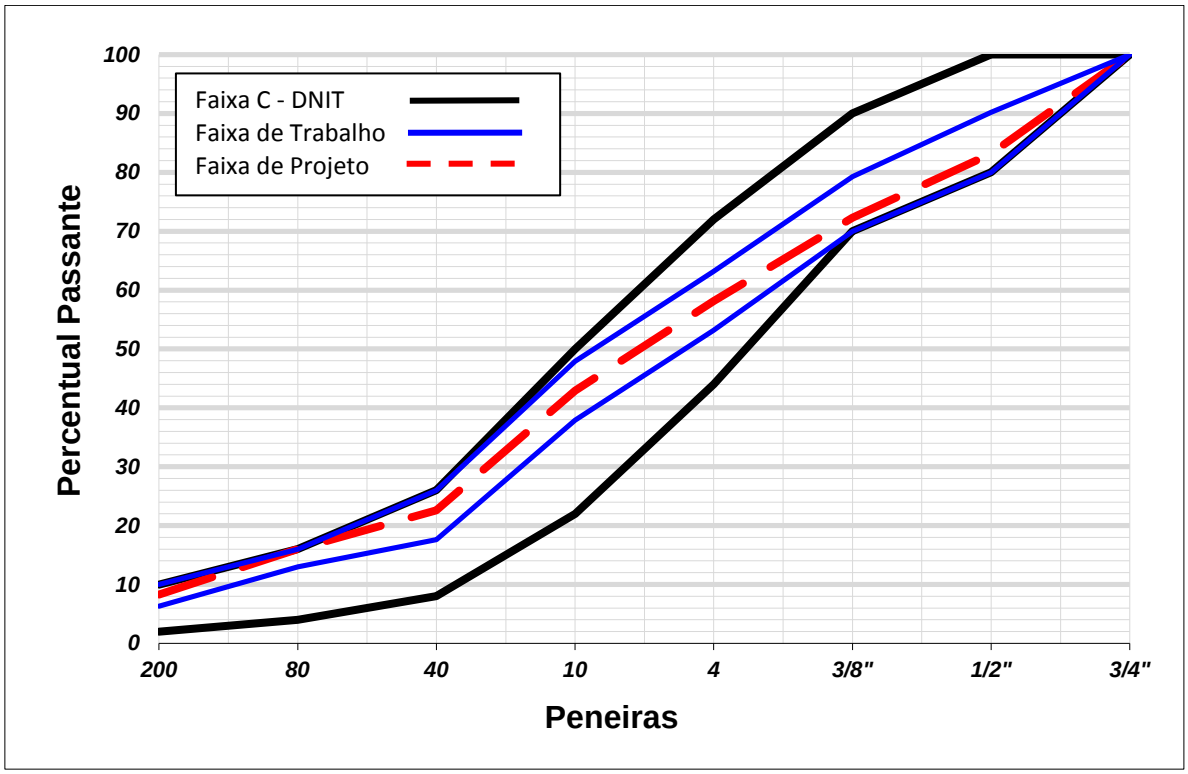
Fonte: Autor, 2017.

Tabela 16 - Percentuais totais da mistura 01

PENEIRA	FAIXA C - DNIT 031/2006 – ES	TOTAL DA MISTURA 01	TOLERÂNCIA (%)	FAIXA DE TRABALHO
3/4"	100	100,0	± 7	100
1/2"	80 – 100	83,2	± 7	80 - 90,2
3/8"	70 – 90	72,3	± 7	70 - 79,3
N° 4	44 – 72	58,2	± 5	53,2 - 63,2
N° 10	22 – 50	42,9	± 5	37,9 - 47,9
N° 40	8 – 26	22,6	± 5	17,6 - 26
N° 80	4 – 16	16,0	± 3	13 - 16
N° 200	2 – 10	8,3	± 2	6,3 - 10

Fonte: Autor, 2017.

Figura 29 - Curva granulométrica da mistura 01 com 100% de agregados naturais



Fonte: Autor, 2017.

Conforme os percentuais estabelecidos acima, foram moldados os 15 (quinze) corpos de prova, 3 (três) para cada teor de ligante (4,0, 4,5, 5,0, 5,5 e 6,0 %), sendo que na Tabela 17 verifica-se a quantidade, em gramas, utilizada para moldagem dos corpos de prova desta mistura, seguindo o método de ensaio DNER-ME 043 (1995).

Tabela 17 - Quantidades utilizadas para moldagem dos CP's da mistura 01

PENEIRA	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ DE PEDRA
3/4"	-	-	-
1/2"	199,84	2,00	-
3/8"	70,68	60,14	-
N° 4	3,85	161,24	4,26
N° 10	0,13	13,89	168,77
N° 40	0,05	0,12	244,12
N° 80	0,21	0,22	78,56
N° 200	0,39	0,70	91,08
FUNDO	0,85	1,69	97,22
Total em g	276,00	240,00	684,00

Fonte: Autor, 2017.

Após moldados os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência. Os resultados médios de cada teor, no Ensaio Marshall, estão expostos na Tabela 18.

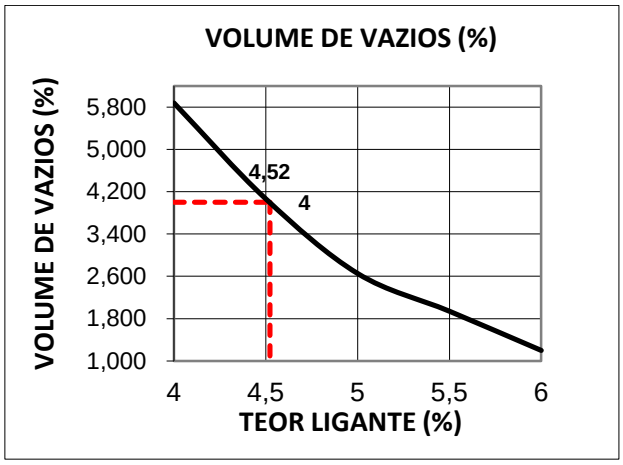
Tabela 18 - Resultados do ensaio Marshall - Mistura 01

ENSAIO MARSHALL	PROPRIEDADES MISTURA 01							
	Teor Asfalto (%)	Massa Espec. Aparente g/cm^3	Massa Espec. Máx. Teór. g/cm^3	Estab. kgf	Fluência 0,01"	Vv (%)	RBV (%)	VAM (%)
TEORES DE ENSAIO	4,00	2,484	2,639	1996	3,6	5,88	62,77	15,78
	4,50	2,510	2,617	2390	4,5	4,06	73,49	15,33
	5,00	2,526	2,595	2204	4,8	2,65	82,60	15,25
	5,50	2,524	2,573	1632	4,7	1,94	87,71	15,78
	6,00	2,522	2,552	1632	4,9	1,20	92,64	16,28
% ótimo de ligante	4,52	2,511	2,616	2382	4,5	4,00	73,9	15,32

Fonte: Autor, 2017.

Verificou-se que, para um volume de vazios de 4% o teor ideal para esta mistura é de 4,52% de ligante asfáltico (FIGURA 30).

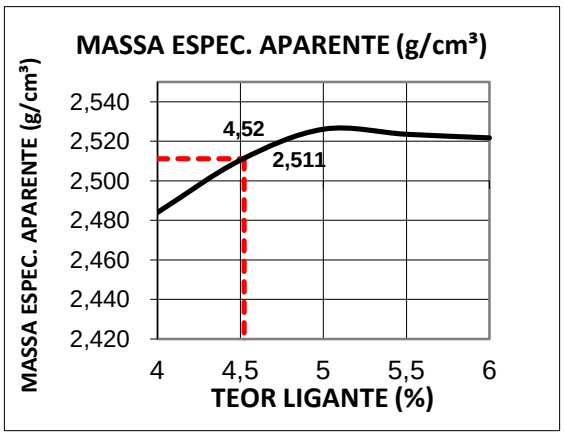
Figura 30 - Teor de ligante x Volume de vazios - Mistura 01



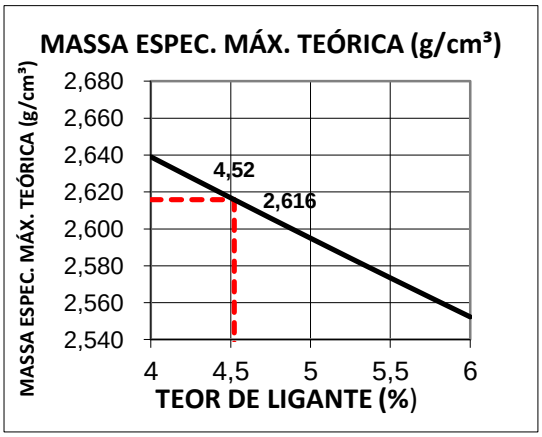
Fonte: Autor, 2017.

Na Figura 31 são apresentados os gráficos para os resultados encontrados no Ensaio Marshall, para as propriedades como massa específica aparente (A), massa específica máxima teórica (B), estabilidade (C), fluência (D), relação betume/vazios (E) e vazios do agregado mineral (F), considerando o teor de projeto ideal de 4,52%.

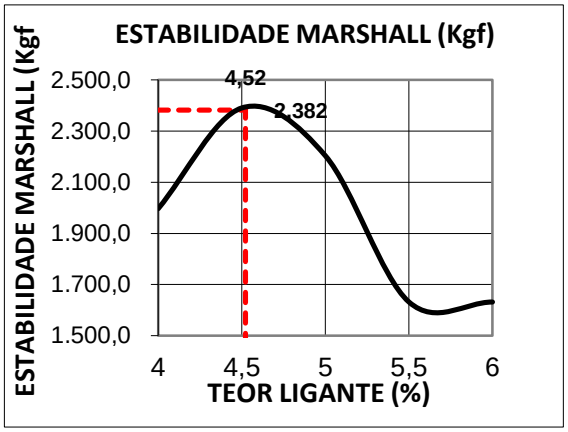
Figura 31 – Resultados do ensaio Marshall da Mistura 01 expressos em gráficos



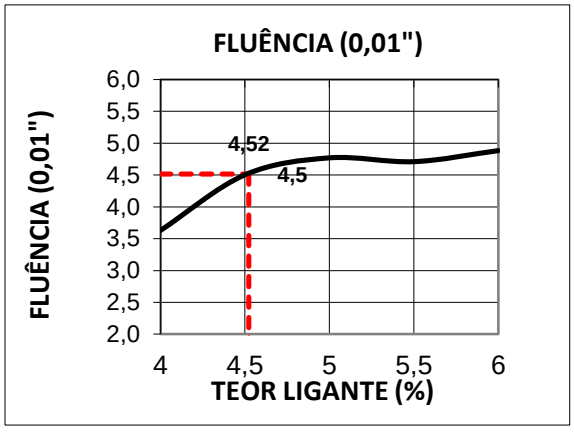
(A)



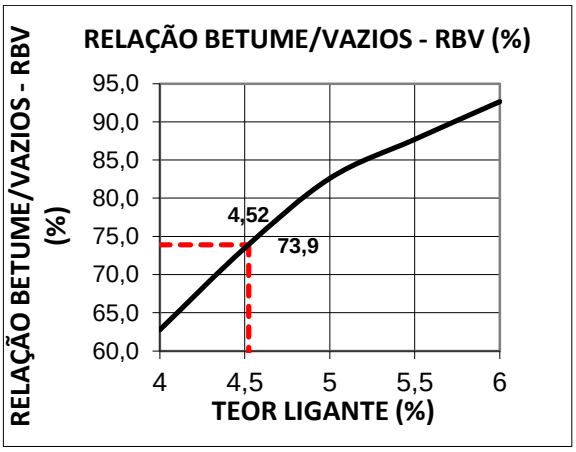
(B)



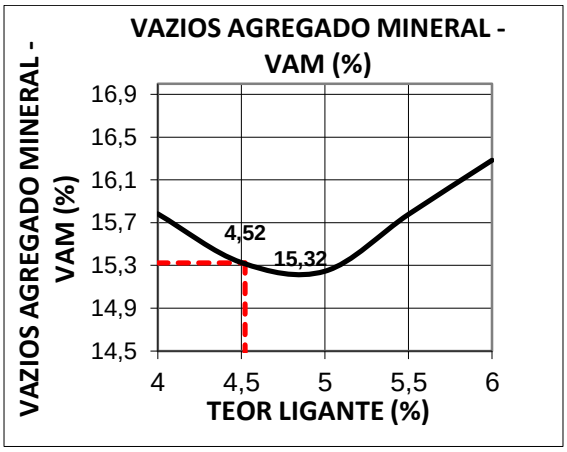
(C)



(D)



(E)



(F)

Fonte: Autor, 2017.

Considerando que a estabilidade refere-se à carga máxima que o corpo de prova suportou até se romper e fluência a deformação total do mesmo, percebe-se que o pico de estabilidade apresentado esteve próximo ao teor ideal de ligante, bem como a fluência, que apresentou elevada deformação até chegar ao teor ótimo e se mantendo estável após, expondo assim uma boa característica desta mistura.

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, a primeira mistura apresentou resultado de 1,52 MPa, como média dos três corpos de prova ensaiados com o teor ótimo, conforme dados da Tabela 19, mostrando-se acima do limite mínimo que é de 0,65 MPa, atendendo portanto, a especificação.

Tabela 19 - Resultados do ensaio de compressão diametral da mistura 01

	CP 01	
Força resistência	14974,70 N	$\sigma_{R=\frac{2\times14974,70}{100\times\pi\times6,23\times10,15}=1,51\ MPa}$
Altura CP	6,23 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
	CP 02	
Força resistência	15484,64 N	$\sigma_{R=\frac{2\times15484,64}{100\times\pi\times6,29\times10,15}=1,54\ MPa}$
Altura CP	6,29 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
	CP 03	
Força resistência	15121,80 N	$\sigma_{R=\frac{2\times15121,80}{100\times\pi\times6,31\times10,15}=1,50\ MPa}$
Altura CP	6,31 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
Resistência por compressão diametral MÉDIA:		1,52 MPa

Fonte: Autor, 2017.

Referente ao ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foram também ensaiados corpos de prova moldados utilizando o teor ótimo encontrado, sendo que esta mistura obteve resultado médio de 7.320 MPa, sendo que as normas vigentes não estipulam valor máximo e mínimo para o MR.

Os resultados da mistura 01 foram utilizados como parâmetro comparativo com as demais misturas, nas quais foram acrescentadas a neobrita. No capítulo 4.6 foram analisados os resultados entre si, comparando a outras pesquisas realizadas, buscando encontrar a mistura ideal dentre as que foram elaboradas.

4.2 Mistura 02 - 75% de agregados naturais e 25% de agregado siderúrgico

A segunda mistura asfáltica foi desenvolvida com 75% de agregados naturais e 25% de neobrita, sendo que a composição granulométrica desta mistura está exposta na Tabela 20.

Tabela 20 - Análise Granulométrica da mistura 02

PENEIRA	BRITA 3/4" % PASSANTE	NEOBRITA % PASSANTE	PÓ DE PEDRA % PASSANTE
3/4"	100,0	100,0	100,0
1/2"	27,6	81,5	100,0
3/8"	2,0	70,9	100,0
N° 4	0,6	42,7	99,4
N° 10	0,5	19,9	74,7
N° 40	0,5	3,1	39,0
N° 80	0,4	1,3	27,5
N° 200	0,3	0,3	14,2

Fonte: Autor, 2017.

Com o auxílio de planilha eletrônica e utilizando os resultados da análise granulométrica, foram definidos os percentuais de cada material, para que se encaixem dentro da faixa granulométrica proposta para este estudo (Faixa C – DNIT). As Tabelas 21 e 22 mostram os resultados encontrados para a mistura 02, onde é possível constatar que foi necessário utilizar 19% de brita 3/4'', 25% de neobrita e 56% de pó de pedra. A Figura 32 apresenta o gráfico com a curva granulométrica encaixada dentro da curva de projeto.

Tabela 21 - Cálculo dos percentuais de cada material da mistura 02 com 75% de agregados naturais e 25% de neobrita

MISTURA 02 com 75% de agregados naturais e 25% de neobrita				
PENEIRA	% BRITA 3/4" % PASS. X FATOR	% NEOBRITA % PASS. X FATOR	% PÓ DE PEDRA % PASS. X FATOR	TOTAL DA MISTURA %
3/4"	100,0 x 19% = 19,0	100,0 x 25% = 25,0	100,0 x 56% = 56,0	100,00
1/2"	27,6 x 19% = 5,2	81,5 x 25% = 20,4	100,0 x 56% = 56,0	81,6
3/8"	2,0 x 19% = 0,4	70,9 x 25% = 17,7	100,0 x 56% = 56,0	74,1
N° 4	0,6 x 19% = 0,1	42,7 x 25% = 10,7	99,4 x 56% = 55,7	66,4
N° 10	0,5 x 19% = 0,1	19,9 x 25% = 5,0	74,7 x 56% = 41,8	46,9
N° 40	0,5 x 19% = 0,1	3,1 x 25% = 0,8	39,0 x 56% = 21,8	22,7
N° 80	0,4 x 19% = 0,1	1,3 x 25% = 0,3	27,5 x 56% = 15,4	15,8
N° 200	0,3 x 19% = 0,1	0,3 x 25% = 0,1	14,2 x 56% = 8,0	8,1

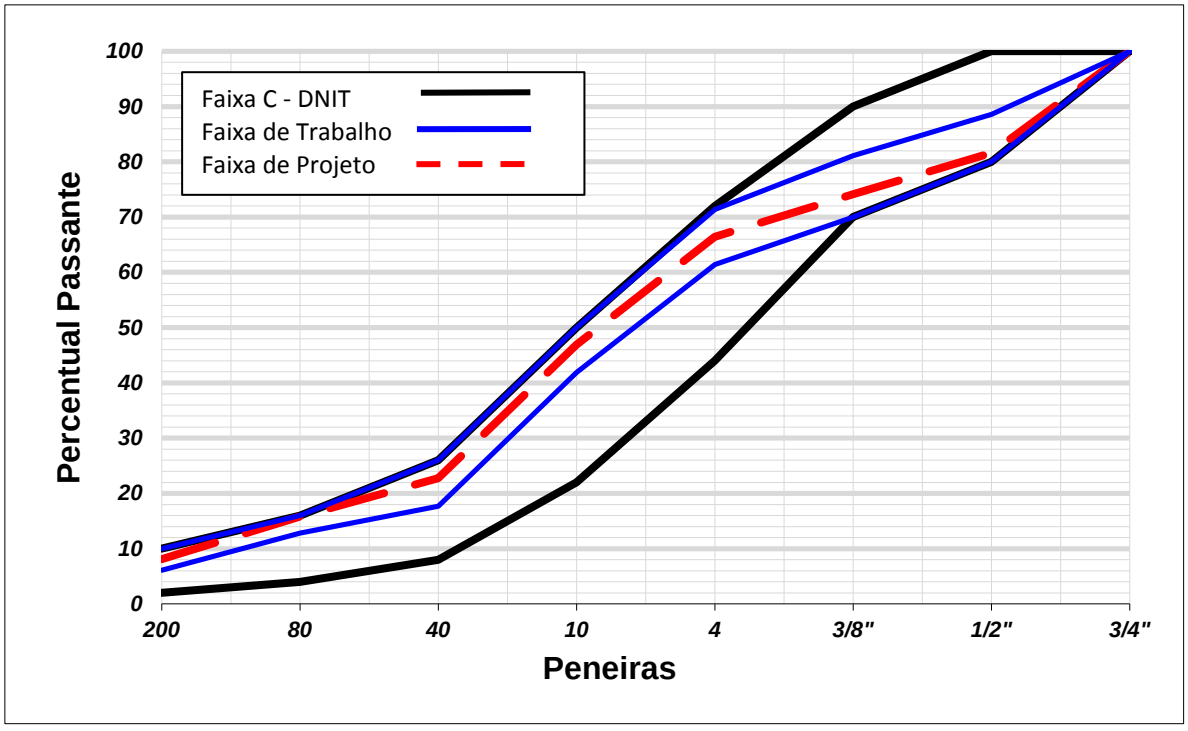
Fonte: Autor, 2017.

Tabela 22 - Percentuais totais da mistura 02

PENEIRA	FAIXA C - DNIT 031/2006 – ES	TOTAL DA MISTURA 02	TOLERÂNCIA (%)	FAIXA DE TRABALHO
3/4"	100	100,0	± 7	100
1/2"	80 - 100	81,6	± 7	80 - 88,6
3/8"	70 - 90	74,1	± 7	70 - 81,1
N° 4	44 - 72	66,4	± 5	61,4 - 71,4
N° 10	22 - 50	46,9	± 5	41,9 - 50
N° 40	8 - 26	22,7	± 5	17,7 - 26
N° 80	4 - 16	15,8	± 3	12,8 - 16
N° 200	2 - 10	8,1	± 2	6,1 - 10

Fonte: Autor, 2017.

Figura 32 - Curva granulométrica da mistura 02 com 75% de agregados naturais e 25% de neobrita



Fonte: Autor, 2017.

Esta mistura, pelo fato de possuir agregado siderúrgico com maior densidade que o agregado natural, teve necessidade de possuir maior massa em seus corpos de prova, sendo que tiveram que ser moldados com 1.220 g ao invés de 1.200 g, a fim de atingir a altura mínima regulamentada de 63,5 mm, com uma margem de 1,3 mm para mais ou para menos. As quantidades utilizadas para moldagem dos corpos de prova estão expostas na Tabela 23.

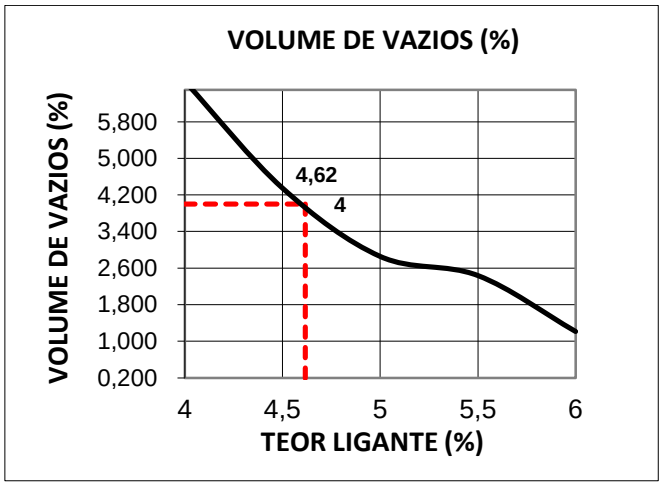
Tabela 23 - Quantidades utilizadas para moldagem dos CP’s da mistura 02

PENEIRA	ESCÓRIA	BRITA 3/4"	PÓ DE PEDRA
3/4"	-	-	-
1/2"	56,52	167,84	-
3/8"	32,22	59,36	-
N° 4	85,96	3,23	4,26
N° 10	69,59	0,11	168,57
N° 40	51,16	0,04	243,83
N° 80	5,72	0,18	78,46
N° 200	2,91	0,33	90,97
FUNDO	0,91	0,71	97,11
Total em g	305,00	231,80	683,20

Fonte: Autor, 2017.

Foram então moldados 15 (quinze) corpos de prova, sendo 3 (três) para cada teor de ligante, pelo método Marshall, ensaio DNER-ME 043 (1995), e submetidos aos ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência. Os resultados médios de cada teor, no Ensaio Marshall, estão expostos na Tabela 24. Percebe-se um pequeno aumento na massa específica e no teor de ligante ideal encontrados. Em comparação com a mistura 01, o teor cresceu de 4,52% para 4,62% (FIGURA 33). Este aumento é esperado também para as próximas misturas, à medida que se adiciona agregado siderúrgico às misturas, por consequência da maior absorção e porosidade quando comparado ao agregado convencional.

Figura 33 - Teor de ligante x Volume de vazios - Mistura 02



Fonte: Autor, 2017.

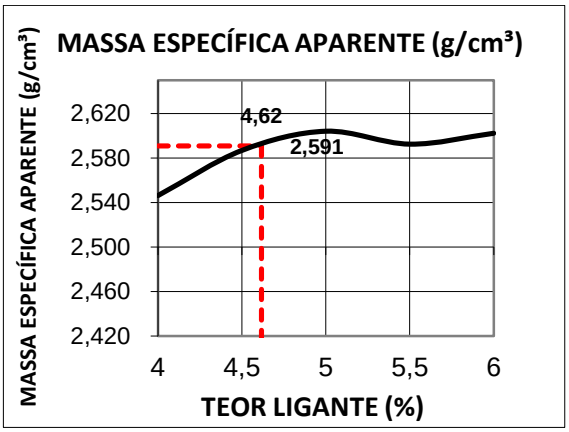
Tabela 24 - Resultados do ensaio Marshall - Mistura 02

ENSAIO MARSHALL	PROPRIEDADES MISTURA 02							
	Teor Asfalto (%)	Massa Espec. Aparente g/cm³	Massa Espec. Máx. Teór. g/cm³	Estab. kgf	Fluência 0,01"	Vv (%)	RBV (%)	VAM (%)
TEORES DE ENSAIO	4,00	2,546	2,729	2129	5,9	6,69	60,30	16,84
	4,50	2,587	2,705	2084	5,2	4,35	72,75	15,95
	5,00	2,604	2,681	2005	4,9	2,85	81,98	15,84
	5,50	2,593	2,657	1840	5,1	2,44	85,37	16,65
	6,00	2,602	2,634	1883	5,1	1,21	92,77	16,78
% ótimo de ligante	4,62	2,591	2,699	2066	5,1	4,00	74,9	15,93

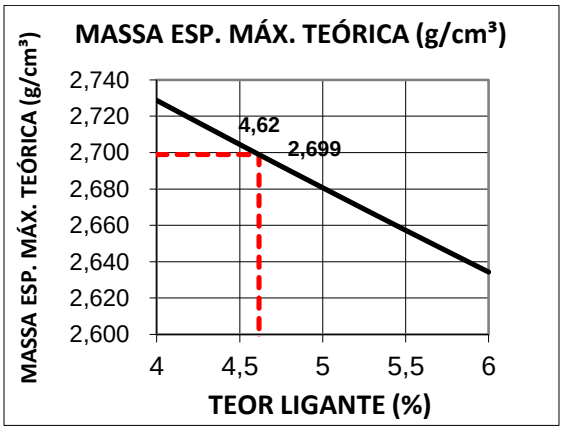
Fonte: Autor, 2017.

Na Figura 34 são apresentados os gráficos para os resultados encontrados no Ensaio Marshall, para as propriedades como massa específica aparente (A), massa específica máxima teórica (B), estabilidade (C), fluência (D), relação betume/vazios (E) e vazios do agregado mineral (F), considerando o teor de projeto ideal de 4,62%.

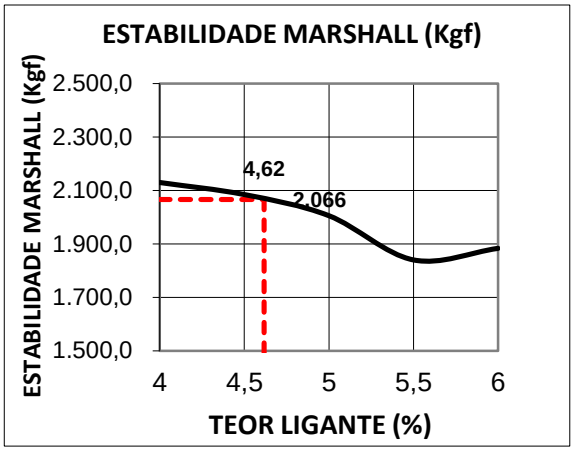
Figura 34 - Resultados do ensaio Marshall da mistura 02 expressos em gráficos



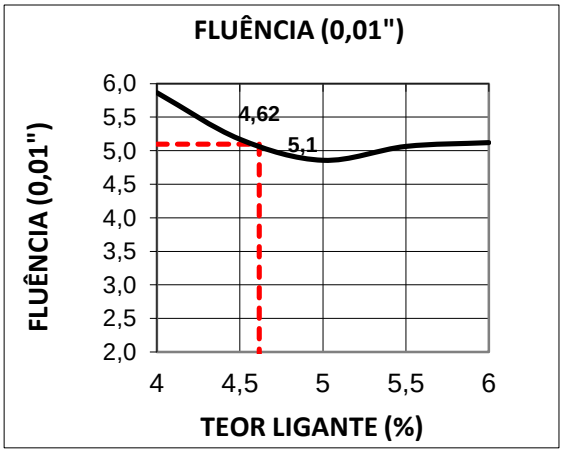
(A)



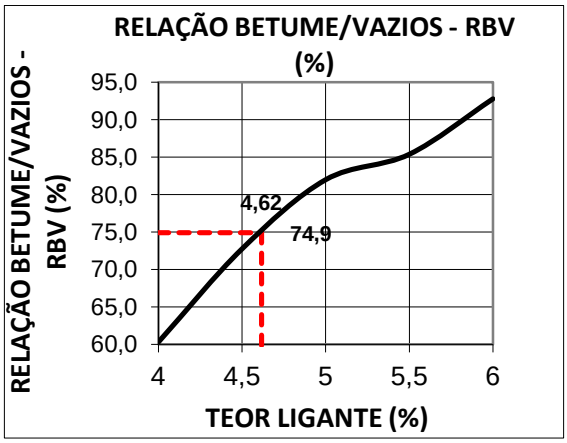
(B)



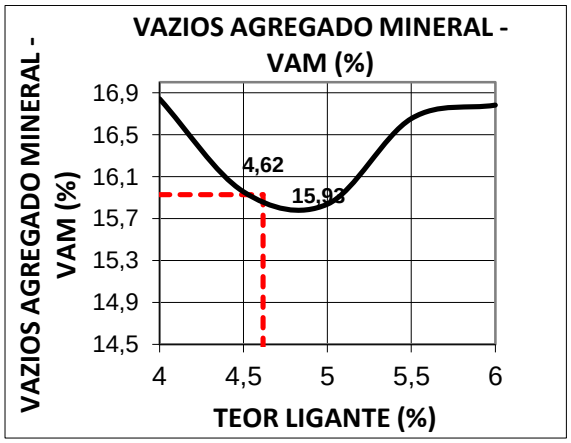
(C)



(D)



(E)



(F)

Fonte: Autor, 2017.

A estabilidade desta mistura se mostrou boa, na medida em que, assim como a mistura 01, atingiu seu pico próximo ao teor de ligante ideal encontrado, obtendo um resultado de 2.066 kgf, acima do mínimo estabelecido pela norma DNIT 031/2006 - ES que é de 500 Kgf. Quanto à relação betume/vazios (RBV) o valor de 74,9% obtido, mesmo estando muito próximo, não atendeu a especificação que é de 75 a 82%.

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral a mistura 02 apresentou resultado médio de 1,31 MPa, acima do limite mínimo estabelecido que é de 0,65 MPa, conforme dados da Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados do ensaio de compressão diametral da mistura 02

	CP 01	
Força resistência	13641 N	$\sigma_R = \frac{2 \times 13641}{100 \times \pi \times 6{,}19 \times 10{,}15} = 1{,}38\ MPa$
Altura CP	6,19 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
	CP 02	
Força resistência	12572,08 N	$\sigma_R = \frac{2 \times 12572{,}08}{100 \times \pi \times 6{,}33 \times 10{,}15} = 1{,}25\ MPa$
Altura CP	6,33 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
	CP 03	
Força resistência	12993,76 N	$\sigma_R = \frac{2 \times 12993{,}76}{100 \times \pi \times 6{,}31 \times 10{,}15} = 1{,}29\ MPa$
Altura CP	6,31 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
Resistência por compressão diametral MÉDIA:		1,31 MPa

Fonte: Autor, 2017.

Referente ao ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foram também ensaiados corpos de prova moldados utilizando o teor ótimo encontrado, sendo que a mistura obteve resultado médio de 8.851 MPa.

4.3 Mistura 03 - 50% de agregados naturais e 50% de agregado siderúrgico

A terceira mistura asfáltica foi desenvolvida com 50% de agregados naturais e 50% de neobrita, sendo que a análise granulométrica desta mistura está exposta na Tabela 26.

Tabela 26 - Análise Granulométrica da mistura 03

PENEIRA	NEOBRITA % PASSANTE	PÓ DE PEDRA % PASSANTE
3/4"	100	100
1/2"	81,5	100
3/8"	70,9	100
N° 4	42,7	99,4
N° 10	19,9	74,7
N° 40	3,1	39
N° 80	1,3	27,5
N° 200	0,3	14,2

Fonte: Autor, 2017.

As Tabelas 27 e 28 mostram os resultados encontrados para a mistura 03, onde se constatou que foi necessário utilizar 50% de neobrita e 50% de pó de pedra, enquanto que a Figura 35 apresenta o gráfico com a curva granulométrica encaixada dentro da curva de projeto.

Tabela 27 - Cálculo dos percentuais de cada material da mistura 03 com 50% de agregados naturais e 50% de neobrita

MISTURA 03 com 50% de agregados naturais e 50% de neobrita			
PENEIRA	% NEOBRITA % PASS. X FATOR	% PÓ DE PEDRA % PASS. X FATOR	TOTAL DA MISTURA %
3/4"	100,0 x 50% = 50,0	100,0 x 50% = 50,0	100,00
1/2"	81,5 x 50% = 40,7	100,0 x 50% = 50,0	90,73
3/8"	70,9 x 50% = 35,5	100,0 x 50% = 50,0	85,45
N° 4	42,7 x 50% = 21,4	99,4 x 50% = 49,7	71,05
N° 10	19,9 x 50% = 10,0	74,7 x 50% = 37,4	47,30
N° 40	3,1 x 50% = 1,6	39,0 x 50% = 19,5	21,07
N° 80	1,3 x 50% = 0,6	27,5 x 50% = 13,8	14,39
N° 200	0,3 x 50% = 0,1	14,2 x 50% = 7,1	7,26

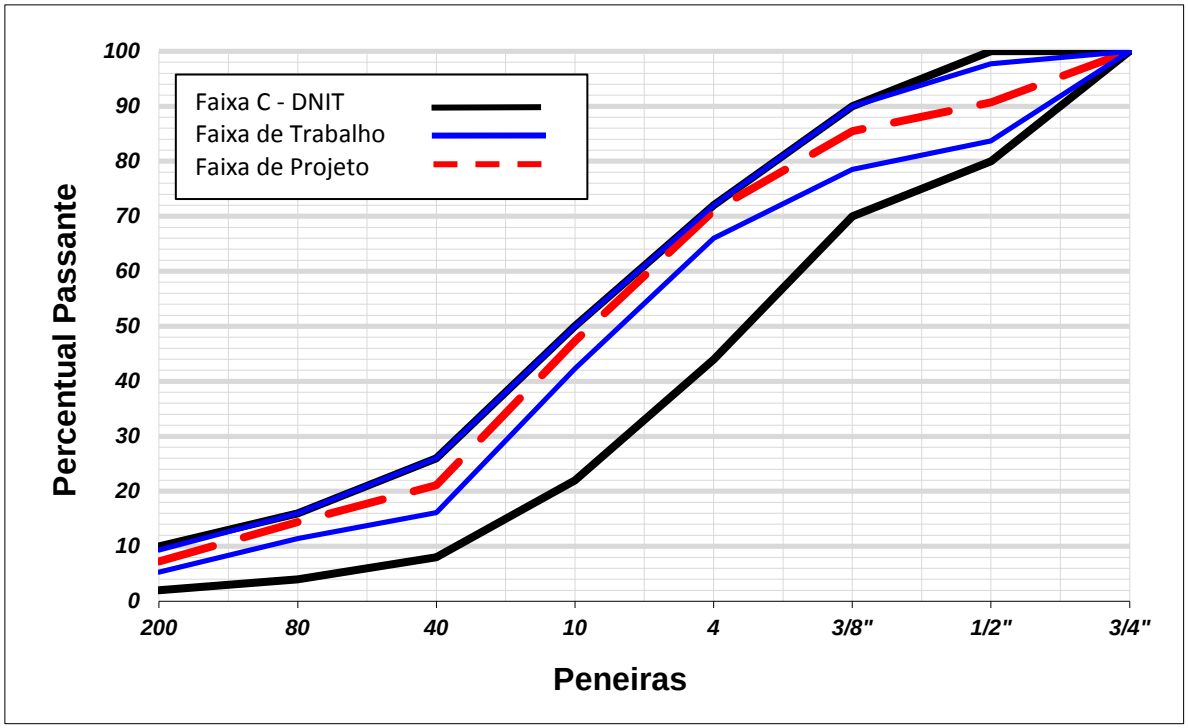
Fonte: Autor, 2017.

Tabela 28 - Percentuais totais da mistura 03

PENEIRA	FAIXA C - DNIT 031/2006 – ES	TOTAL DA MISTURA 03	TOLERÂNCIA (%)	FAIXA DE TRABALHO
3/4"	100	100,0	± 7	100
1/2"	80 - 100	90,7	± 7	83,7 - 97,7
3/8"	70 - 90	85,5	± 7	78,5 - 90
N° 4	44 - 72	71,0	± 5	66 - 72
N° 10	22 - 50	47,3	± 5	42,3 - 50
N° 40	8 - 26	21,1	± 5	16,1 - 26
N° 80	4 - 16	14,4	± 3	11,4 - 16
N° 200	2 - 10	7,3	± 2	5,3 - 9,3

Fonte: Autor, 2017.

Figura 35 - Curva granulométrica da mistura 03 com 50% de agregados naturais e 50% de neobrita



Fonte: Autor, 2017.

Nesta mistura, também foi necessário moldar os corpos de prova com maior massa que o usual, com o objetivo de atingir a altura mínima regulamentada de 63,5 mm, com uma margem de 1,3 mm para mais ou para menos, sendo moldados com 1.225 g ao invés de 1.200 g, devido a maior densidade do agregado siderúrgico quando comparado ao agregado natural. Seguindo os percentuais estabelecidos para esta mistura, a Tabela 29 mostra as quantidades utilizadas para moldagem dos corpos de prova.

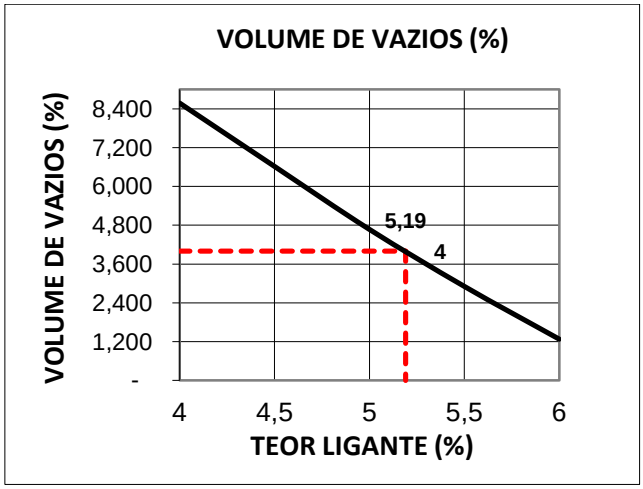
Tabela 29 - Quantidades utilizadas para moldagem dos CP's da mistura 03

PENEIRA	ESCÓRIA	PÓ DE PEDRA
3/4"	-	-
1/2"	113,50	-
3/8"	64,71	-
N° 4	172,62	3,82
N° 10	139,76	151,12
N° 40	102,75	218,60
N° 80	11,49	70,34
N° 200	5,84	81,56
FUNDO	1,83	87,06
Total em g	612,50	612,50

Fonte: Autor, 2017.

Com os 15 (quinze) corpos de prova moldados, pelo método Marshall, ensaio DNER-ME 043 (1995), e submetidos aos ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência, obtiveram-se os resultados da Tabela 30. Verifica-se que, para um volume de vazios de 4% o teor ideal para esta mistura é de 5,19% de ligante asfáltico (FIGURA 36).

Figura 36 - Teor de ligante x Volume de vazios - Mistura 03



Fonte: Autor, 2017.

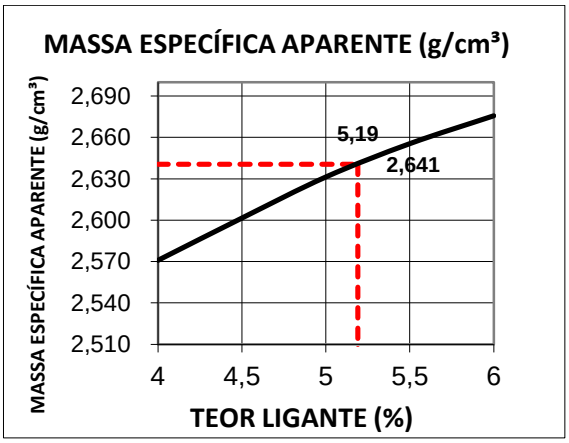
Tabela 30 - Resultados do ensaio Marshall - Mistura 03

ENSAIO MARSHALL	PROPRIEDADES MISTURA 03							
	Teor Asfalto (%)	Massa Espec. Aparente g/cm³	Massa Espec. Máx. Teór. g/cm³	Estab. kgf	Fluência 0,01"	Vv (%)	RBV (%)	VAM (%)
TEORES DE ENSAIO	4,00	2,571	2,812	1191	4,7	8,58	54,45	18,83
	4,50	2,602	2,786	1437	4,7	6,62	63,81	18,29
	5,00	2,631	2,760	1822	3,6	4,67	73,74	17,79
	5,50	2,655	2,735	2012	3,4	2,91	83,35	17,47
	6,00	2,676	2,710	2150	3,5	1,28	92,61	17,28
% ótimo de ligante	5,19	2,641	2,751	1894	3,5	4,00	77,4	17,67

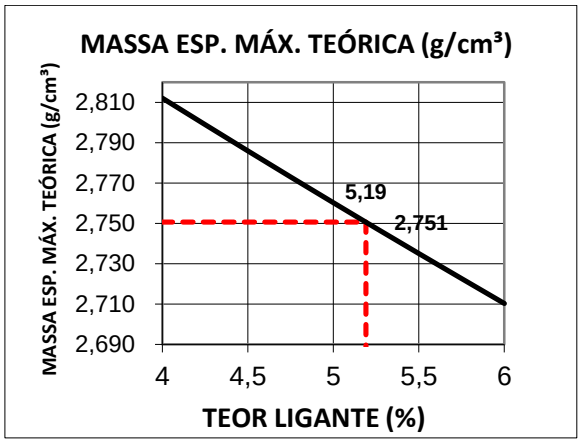
Fonte: Autor, 2017.

Na Figura 37 são apresentados os gráficos para os resultados encontrados no Ensaio Marshall, para as propriedades como massa específica aparente (A), massa específica máxima teórica (B), estabilidade (C), fluência (D), relação betume/vazios (E) e vazios do agregado mineral (F), considerando o teor de projeto ideal de 5,19%.

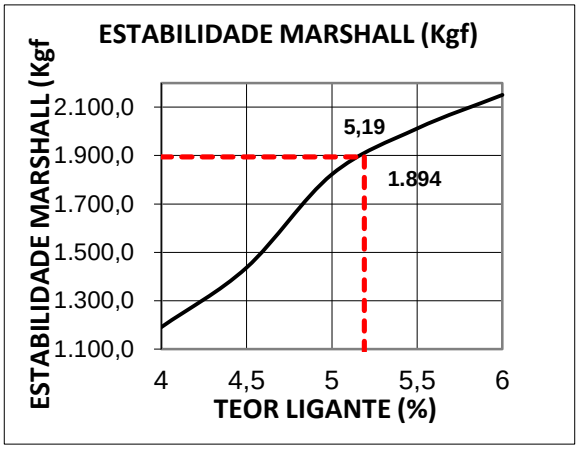
Figura 37 - Resultados do ensaio Marshall da Mistura 03 expressos em gráficos



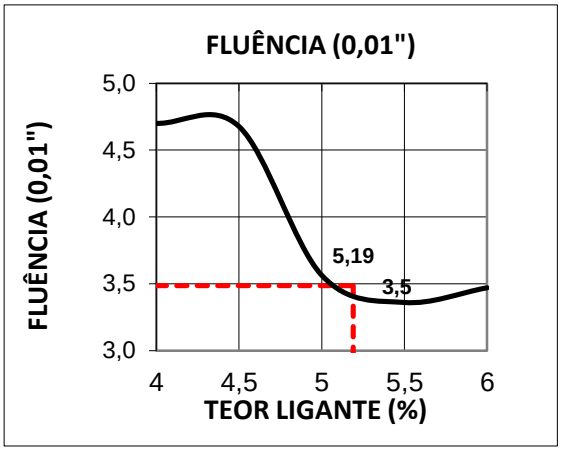
(A)



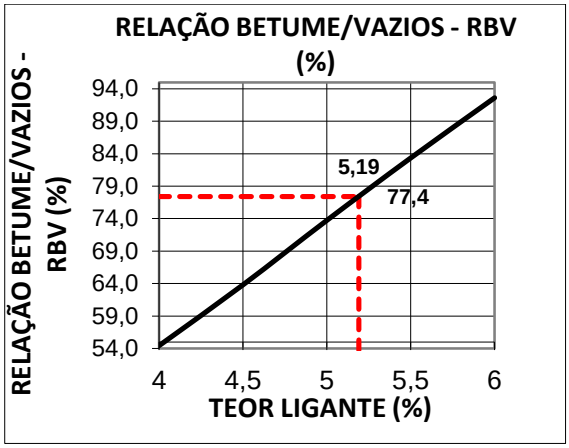
(B)



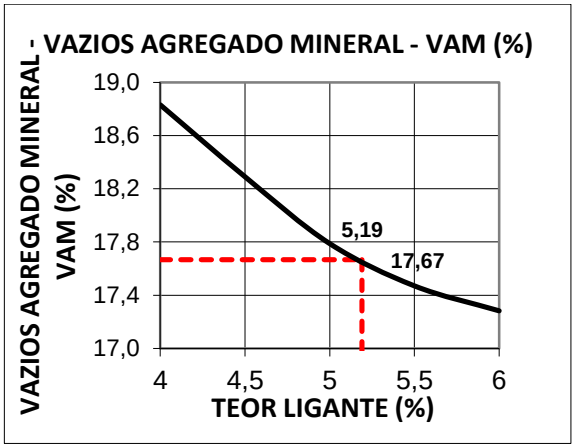
(C)



(D)



(E)



(F)

Fonte: Autor, 2017.

O aumento na densidade e no teor de ligante ideal permanece e em comparação com a mistura anterior, o teor cresceu de 4,62% para 5,19%. A estabilidade da mistura 03 se manteve também acima do mínimo estabelecido pela norma que é de 500 Kgf, sendo que atingiu 1.894 kgf. Em relação ao percentual de betume/vazios (RBV) o valor de 77,4% obtido, atendeu a especificação da norma DNIT 031/2006 – ES, que é de 75 a 82%.

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral a mistura 03 apresentou resultado médio de 1,22 MPa, acima do limite mínimo estabelecido que é de 0,65 MPa, conforme dados da Tabela 31.

Tabela 31 - Resultados do ensaio de compressão diametral da mistura 03

	CP 01	
Força resistência	12258,27 N	$\sigma_{R=\frac{2\times12258,27}{100\times\pi\times6,24\times10,15}=1,23\ MPa}$
Altura CP	6,24 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
	CP 02	
Força resistência	11434,51 N	$\sigma_{R=\frac{2\times11434,51}{100\times\pi\times6,12\times10,15}=1,17\ MPa}$
Altura CP	6,12 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
	CP 03	
Força resistência	12375,95 N	$\sigma_{R=\frac{2\times12375,95}{100\times\pi\times6,20\times10,15}=1,25\ MPa}$
Altura CP	6,20 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
Resistência por compressão diametral MÉDIA:		1,22 MPa

Fonte: Autor, 2017.

Referente ao ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foram também ensaiados corpos de prova moldados utilizando o teor ótimo encontrado, sendo que a mistura 03 obteve resultados médio de 8.368 MPa.

4.4 Mistura 04 - 25% de agregados naturais e 75% de agregado siderúrgico

A quarta mistura asfáltica desenvolvida foi com 25% de agregados naturais e 75% de neobrita, sendo que a análise granulométrica desta mistura esta exposta na Tabela 32.

Tabela 32 - Análise granulométrica da mistura 04

PENEIRA	NEOBRITA % PASSANTE	PÓ DE PEDRA % PASSANTE
3/4"	100	100
1/2"	81,5	100
3/8"	70,9	100
N° 4	42,7	99,4
N° 10	19,9	74,7
N° 40	3,1	39
N° 80	1,3	27,5
N° 200	0,3	14,2

Fonte: Autor, 2017.

Utilizando os resultados da análise granulométrica, através de planilha eletrônica, foram definidos os percentuais de cada material, para que se encaixem dentro da faixa granulométrica proposta para este estudo (Faixa C – DNIT). Nas Tabelas 33 e 34 estão os resultados encontrados para a mistura 04, onde é possível verificar que com a utilização de 25% de neobrita e 75% de pó de pedra, a mistura permanece dentro da Faixa “C”. A Figura 38 apresenta o gráfico com a curva granulométrica encaixada dentro da curva de projeto.

Tabela 33 - Cálculo dos percentuais dos materiais da mistura 04 com 25% de agregados naturais e 75% de neobrita

MISTURA 04 com 25% de agregados naturais e 75% de neobrita			
PENEIRA	% NEOBRITA % PASS. X FATOR	% PÓ DE PEDRA % PASS. X FATOR	TOTAL DA MISTURA %
3/4"	100,0 x 75% = 50,0	100,0 x 25% = 50,0	100,00
1/2"	81,5 x 75% = 40,7	100,0 x 25% = 50,0	86,1
3/8"	70,9 x 75% = 35,5	100,0 x 25% = 50,0	78,2
N° 4	42,7 x 75% = 21,4	99,4 x 25% = 49,7	56,9
N° 10	19,9 x 75% = 10,0	74,7 x 25% = 37,4	33,6
N° 40	3,1 x 75% = 1,6	39,0 x 25% = 19,5	12,1
N° 80	1,3 x 75% = 0,6	27,5 x 25% = 13,8	7,8
N° 200	0,3 x 75% = 0,1	14,2 x 25% = 7,1	3,8

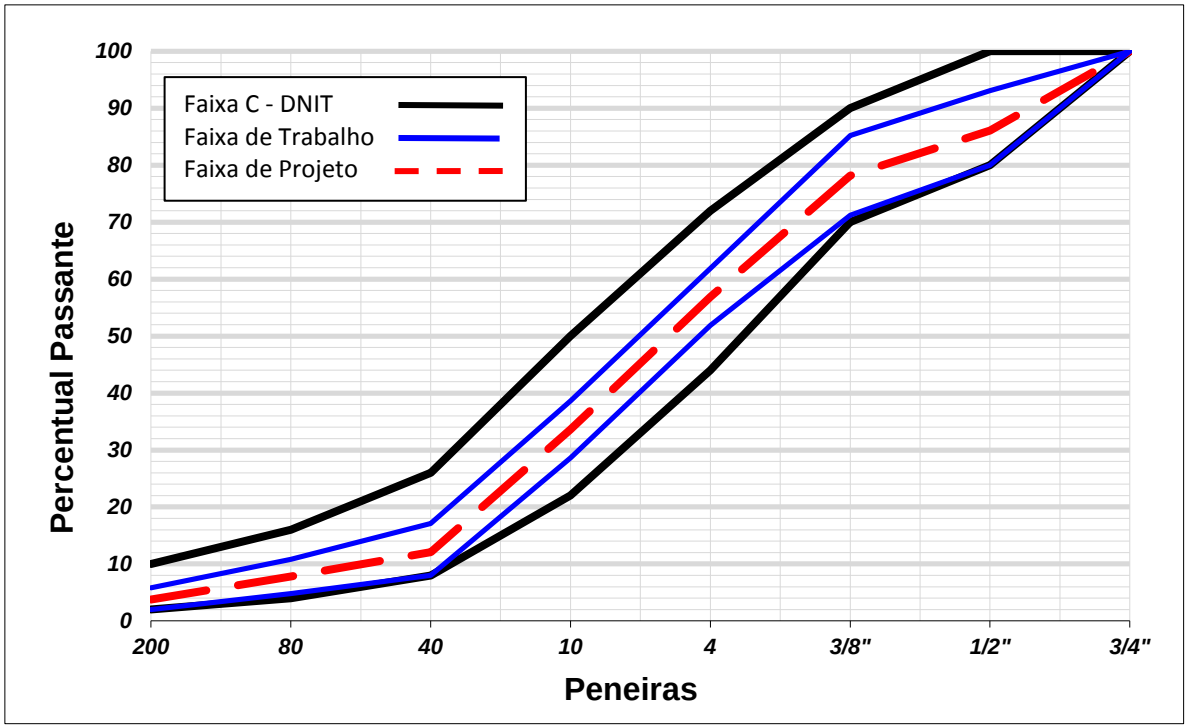
Fonte: Autor, 2017.

Tabela 34 - Percentuais totais da mistura 04

PENEIRA	FAIXA C - DNIT 031/2006 – ES	TOTAL DA MISTURA 04	TOLERÂNCIA (%)	FAIXA DE TRABALHO
3/4"	100	100,00	± 7	100
1/2"	80 - 100	86,1	± 7	80 - 93,1
3/8"	70 - 90	78,2	± 7	71,2 - 85,2
N° 4	44 - 72	56,9	± 5	51,9 - 61,9
N° 10	22 - 50	33,6	± 5	28,6 - 38,6
N° 40	8 - 26	12,1	± 5	8 - 17,1
N° 80	4 - 16	7,8	± 3	4,8 - 10,8
N° 200	2 - 10	3,8	± 2	2 - 5,8

Fonte: Autor, 2017.

Figura 38 - Curva granulométrica da mistura 04 com 25% de agregados naturais e 75% de neobrita



Fonte: Autor, 2017.

Para a mistura 04, com percentual maior de escória, os corpos de prova foram moldados com 1.235 g ao invés de 1.200 g, para atingir a altura mínima regulamentada de 63,5 mm, com uma margem de 1,3 mm para mais ou para menos, sendo que as quantidades utilizadas estão expostas na Tabela 35.

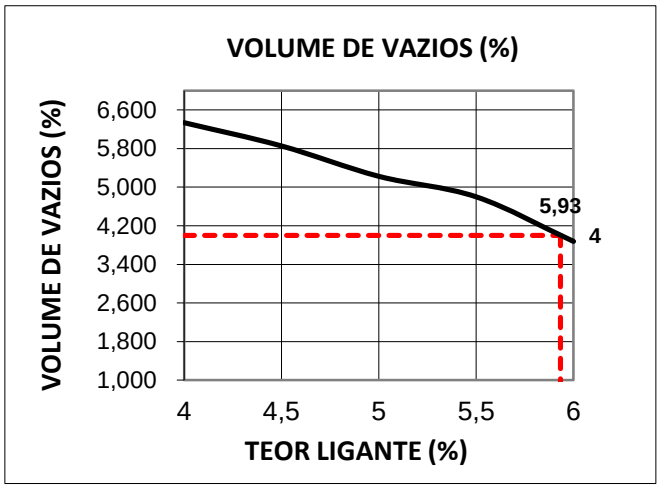
Tabela 35 - Quantidades utilizadas para moldagem dos CP's da mistura 04

PENEIRA	ESCÓRIA	PÓ DE PEDRA
3/4"	-	-
3/8"	97,86	-
N° 4	261,05	1,92
N° 10	211,35	76,18
N° 40	155,38	110,19
N° 80	17,38	35,46
N° 200	8,83	41,11
FUNDO	2,77	43,89
Total em g	926,25	308,75

Fonte: Autor, 2017.

Foram então moldados 15 (quinze) corpos de prova, sendo 3 (três) para cada teor de ligante, pelo método Marshall, ensaio DNER-ME 043 (1995), e submetidos aos ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência. Os resultados médios de cada teor, no Ensaio Marshall, estão expostos na Tabela 36. Verifica-se que teor de ligante ideal desta mistura, para 4% de volume de vazios, ficou em 5,93%, o mais alto teor encontrado neste estudo, por consequência do maior percentual de agregado siderúrgico (FIGURA 39).

Figura 39 - Teor de ligante x Volume de vazios - Mistura 04



Fonte: Autor, 2017.

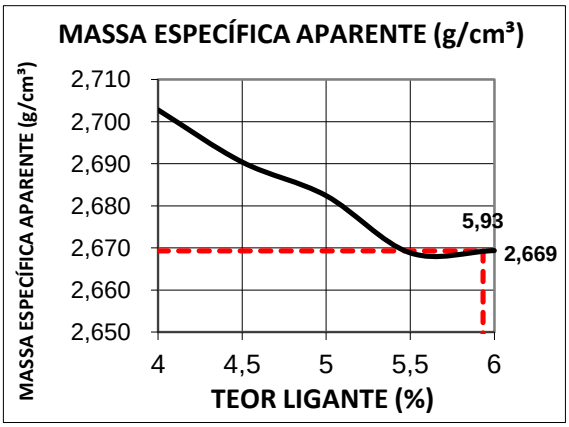
Tabela 36 - Resultados do ensaio Marshall - Mistura 04

ENSAIO MARSHALL	PROPRIEDADES MISTURA 04							
	Teor Asfalto (%)	Massa Espec. Aparente g/cm³	Massa Espec. Máx. Teór. g/cm³	Estab. kgf	Fluência 0,01"	Vv (%)	RBV (%)	VAM (%)
TEORES DE ENSAIO	4,00	2,703	2,886	1159	6,1	6,34	62,98	17,11
	4,50	2,690	2,858	1102	6,1	5,85	67,34	17,92
	5,00	2,682	2,830	1162	6,0	5,22	71,91	18,60
	5,50	2,669	2,803	1205	5,8	4,80	75,30	19,43
	6,00	2,669	2,777	1245	5,4	3,88	95,05	16,80
% ótimo de ligante	5,93	2,669	2,781	1240	5,5	4,00	92,4	17,15

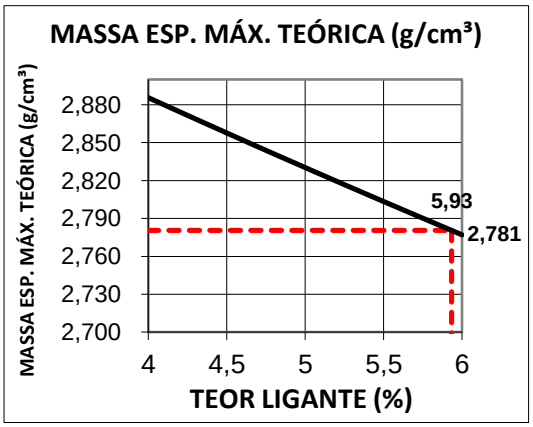
Fonte: Autor, 2017.

Na figura 40 são apresentados os gráficos para os resultados encontrados no Ensaio Marshall, para as propriedades como massa específica aparente (A), massa específica máxima teórica (B), estabilidade (C), fluência (D), relação betume/vazios (E) e vazios do agregado mineral (F), considerando o teor de projeto ideal de 5,93%.

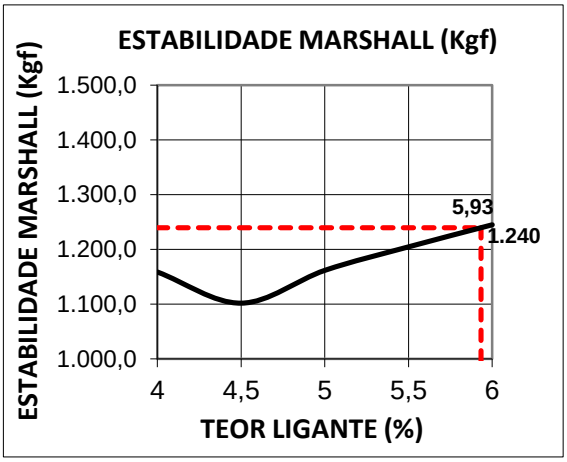
Figura 40 - Resultados do ensaio Marshall da Mistura 04 expressos em gráficos



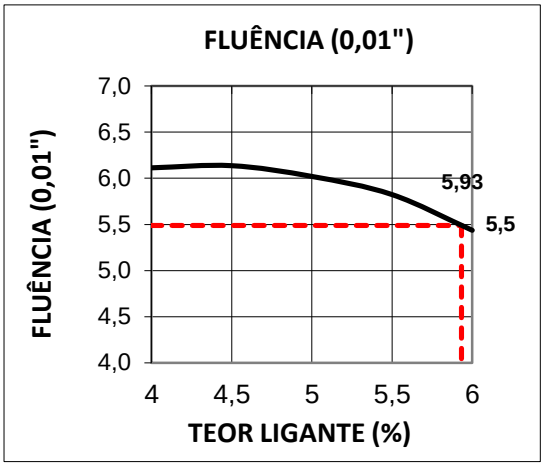
(A)



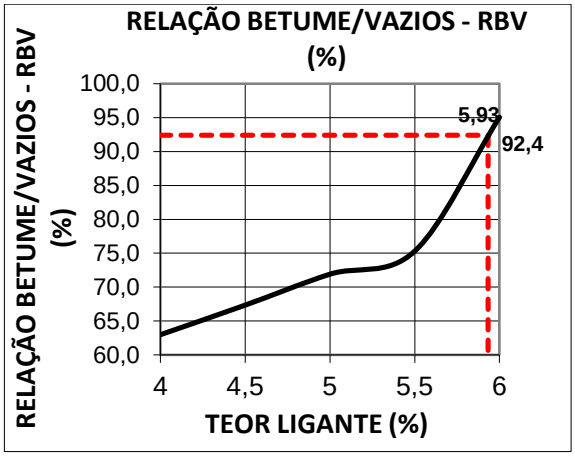
(B)



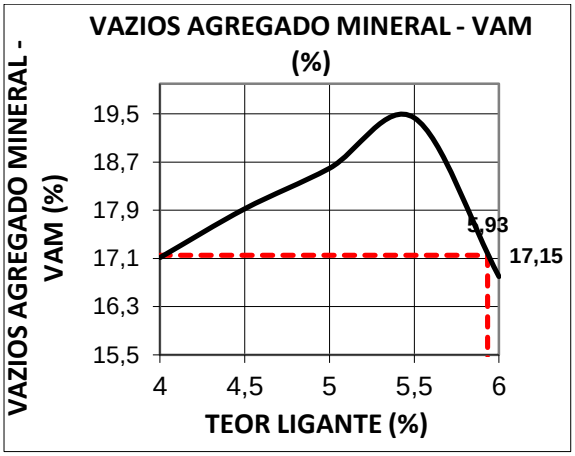
(C)



(D)



(E)



(F)

Fonte: Autor, 2017.

A estabilidade Marshall atinge seu pico próximo ao teor de ligante ideal encontrado, que mostra boa característica, obtendo um resultado de 1.240 kgf, acima do mínimo estabelecido pela norma DNIT 031/2006 - ES que é de 500 Kgf. Quanto à relação betume/vazios (RBV) o valor de 92,4% obtido, não atende a especificação que é de 75 a 82%, também conforme norma DNIT 031/2006 – ES.

Referente ao ensaio de compressão diametral, a mistura 04 apresentou resistência média de 1,01 Mpa, acima do que a norma exige que é de 0,65 Mpa, resultados estes expostos na Tabela 37.

Tabela 37 - Resultados do ensaio de compressão diametral da mistura 04

	CP 01	
Força resistência	9747,77 N	$\sigma_{R=}\frac{2\times9747,77}{100\times\pi\times6,22\times10,15}=0,98\ MPa$
Altura CP	6,22 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
	CP 02	
Força resistência	10091,01 N	$\sigma_{R=}\frac{2\times10091,01}{100\times\pi\times6,21\times10,15}=1,02\ MPa$
Altura CP	6,21 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
	CP 03	
Força resistência	10463,66 N	$\sigma_{R=}\frac{2\times10463,66}{100\times\pi\times6,40\times10,15}=1,03\ MPa$
Altura CP	6,40 cm	
Diâmetro CP	10,15 cm	
Resistência por compressão diametral MÉDIA:		1,01 MPa

Fonte: Autor, 2017.

Referente ao ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foram também ensaiados corpos de prova moldados utilizando o teor ótimo encontrado, sendo que a mistura 04 obteve resultado médio de 6.621 MPa.

4.5 Mistura 05 - 100% de agregado siderúrgico

O quinto e último projeto de mistura desenvolvido foi com 100% de neobrita, sendo que a análise granulométrica desta mistura esta exposta na Tabela 38.

Tabela 38 - Análise granulométrica da mistura 05

PENEIRA	NEOBRITA % PASSANTE
3/4"	100
1/2"	81,5
3/8"	70,9
N° 4	42,7
N° 10	19,9
N° 40	3,1
N° 80	1,3
N° 200	0,3

Fonte: Autor, 2017.

Nas Tabelas 39 e 40 estão os resultados encontrados para a mistura 05, onde se percebe que a mistura com 100% de agregado siderúrgico não atende a faixa granulométrica proposta para este estudo, estando fora da Faixa C – DNIT. A Figura 41 mostra a curva granulométrica fora da faixa especificada.

Tabela 39 - Cálculo dos percentuais dos materiais da mistura 05 com 100% de neobrita

MISTURA 05 com 100% de neobrita						
PENEIRA	**% NEOBRITA % PASS. X FATOR**					**TOTAL DA MISTURA %**
3/4"	100	x	100%	=	100	100
1/2"	81,5	x	100%	=	81,5	81,5
3/8"	70,9	x	100%	=	70,9	70,9
N° 4	42,7	x	100%	=	42,7	42,7
N° 10	19,9	x	100%	=	19,9	19,9
N° 40	3,1	x	100%	=	3,1	3,1
N° 80	1,3	x	100%	=	1,3	1,3
N° 200	0,3	x	100%	=	0,3	0,3

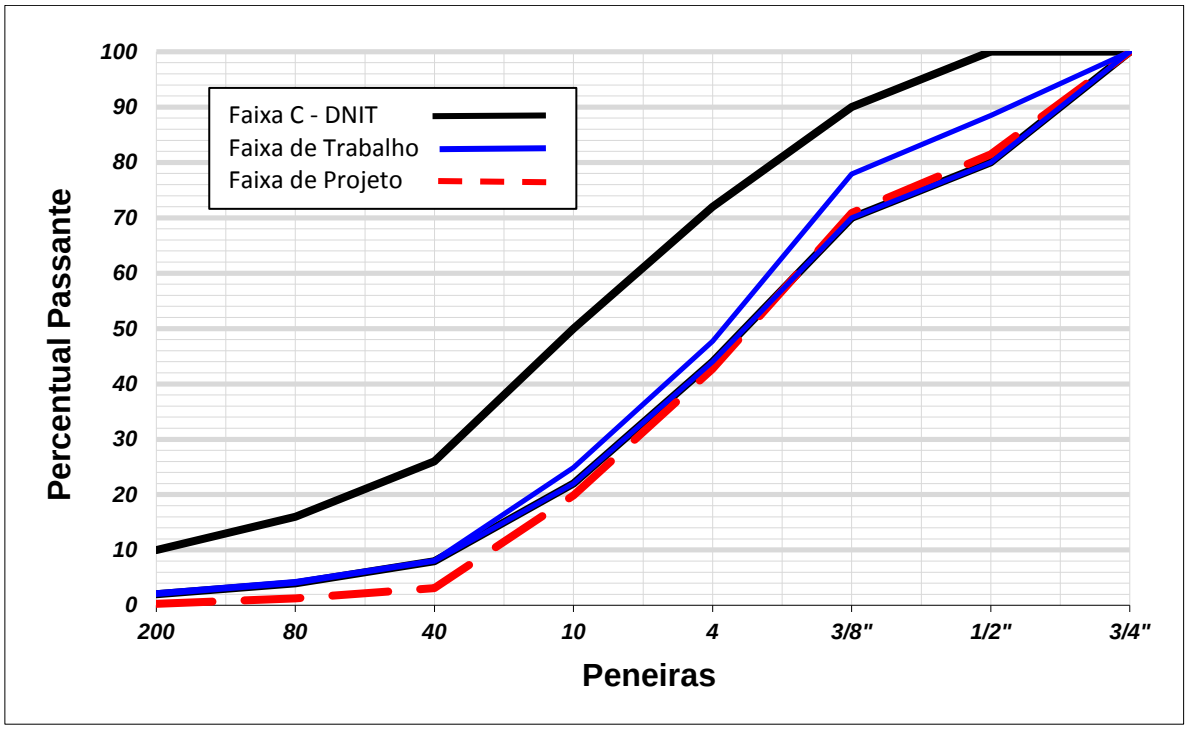
Fonte: Autor, 2017.

Tabela 40 - Percentuais totais da mistura 05

PENEIRA	**FAIXA C - DNIT 031/2006 – ES**	**TOTAL DA MISTURA 05**
3/4"	100	100
1/2"	80 - 100	81,5
3/8"	70 - 90	70,9
N° 4	44 - 72	42,7
N° 10	22 - 50	19,9
N° 40	8 - 26	3,1
N° 80	4 - 16	1,3
N° 200	2 - 10	0,3

Fonte: Autor, 2017.

Figura 41 - Curva granulométrica da mistura 05 com 100% de neobrita



Fonte: Autor, 2017.

Pelo fato de não se enquadrar dentro da faixa granulométrica especificada para este estudo (Faixa C – DNIT), para a mistura 05, com 100% de agregado siderúrgico, não foram moldados corpos de prova.

4.6 Análise comparativa dos resultados

Para efeito comparativo e análise, foram agrupados os resultados encontrados, salientando que:

- Mistura 01 - 100% agregados naturais
- Mistura 02 - 75% agregado natural e 25% siderúrgico
- Mistura 03 - 50% agregado natural e 50% siderúrgico
- Mistura 04 - 25% agregado natural e 75% siderúrgico
- Mistura 05 - 100% agregado siderúrgico

A análise granulométrica das cinco misturas encontra-se na Tabela 41, sendo possível a verificação de que a mistura 05 não se encaixou na faixa de projeto deste estudo, diferente das demais.

Nota-se também que as misturas asfálticas 01, 02, 03 e 04, apesar de estarem dentro da mesma faixa granulométrica (Faixa C-DNIT), ainda apresentam percentuais muito distantes em cada peneira, citando como exemplo a peneira de nº 200, onde a Faixa C-DNIT atesta que as misturas necessitam estar entre 2 e 10%, sendo que a mistura 01 possui 8,3% e a mistura 04 apenas 3,8%. Ambas permanecem dentro da faixa especificada, porém a mistura 04 possui menor percentual de material fino na sua composição, sendo que esta desproporção pode também ter refletido no aumento de percentual de ligante. Para obter percentuais mais próximos em cada peneira, seria preciso utilizar percentuais diferentes de cada material, porém neste estudo, decidiu-se manter as proporções de 25%, 50% e 75% de agregado siderúrgico, para fins comparativos.

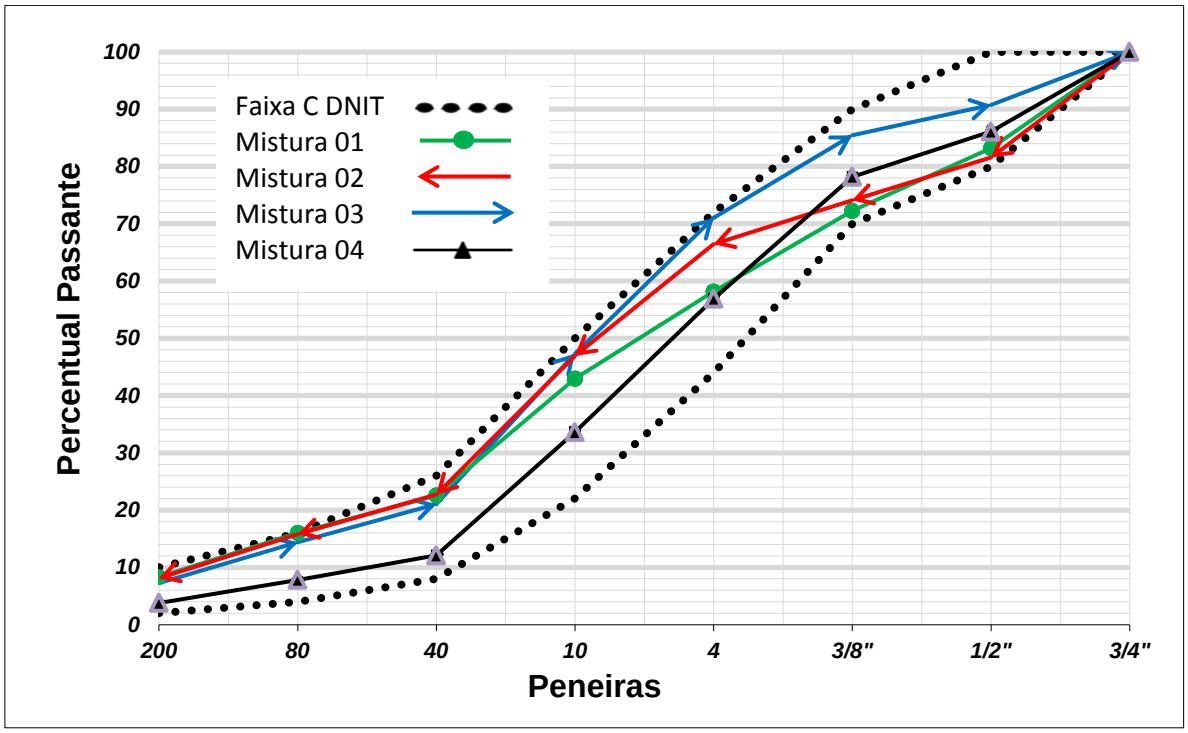
Na Figura 42 é possível verificar as curvas granulométricas das misturas desenvolvidas, encaixadas dentro da faixa de estudo, porém de certa forma distantes umas das outras.

Tabela 41 - Análise granulométrica das 5 misturas desenvolvidas

PENEIRA	FAIXA C - DNIT	MISTURA 01		MISTURA 02		MISTURA 03		MISTURA 04		MISTURA 05	
3/4"	**100**	100,0	Dentro da Faixa	100,0	Dentro da Faixa	100,0	Dentro da Faixa	100,0	Dentro da Faixa	100,0	Dentro da Faixa
1/2"	**80 - 100**	83,2	Dentro da Faixa	81,6	Dentro da Faixa	90,7	Dentro da Faixa	86,1	Dentro da Faixa	81,5	Dentro da Faixa
3/8"	**70 - 90**	72,3	Dentro da Faixa	74,1	Dentro da Faixa	85,5	Dentro da Faixa	78,2	Dentro da Faixa	70,9	Dentro da Faixa
N° 4	**44 - 72**	58,2	Dentro da Faixa	66,4	Dentro da Faixa	71,0	Dentro da Faixa	56,9	Dentro da Faixa	42,7	**Fora da Faixa**
N° 10	**22 - 50**	42,9	Dentro da Faixa	46,9	Dentro da Faixa	47,3	Dentro da Faixa	33,6	Dentro da Faixa	19,9	**Fora da Faixa**
N° 40	**8 - 26**	22,6	Dentro da Faixa	22,7	Dentro da Faixa	21,1	Dentro da Faixa	12,1	Dentro da Faixa	3,1	**Fora da Faixa**
N° 80	**4 - 16**	16,0	Dentro da Faixa	15,8	Dentro da Faixa	14,4	Dentro da Faixa	7,8	Dentro da Faixa	1,3	**Fora da Faixa**
N° 200	**2 - 10**	8,3	Dentro da Faixa	8,1	Dentro da Faixa	7,3	Dentro da Faixa	3,8	Dentro da Faixa	0,3	**Fora da Faixa**

Fonte: Autor, 2017.

Figura 42 - Curvas granulométricas das 4 misturas desenvolvidas



Fonte: Autor, 2017.

Apresentam-se na Tabela 42, todos os resultados obtidos pelo autor neste estudo, comparando com os limites estipulados pela norma DNIT 031/2006, sendo que os mesmos foram analisados e comentados separadamente na sequência do trabalho.

Tabela 42 - Resultados encontrados neste estudo

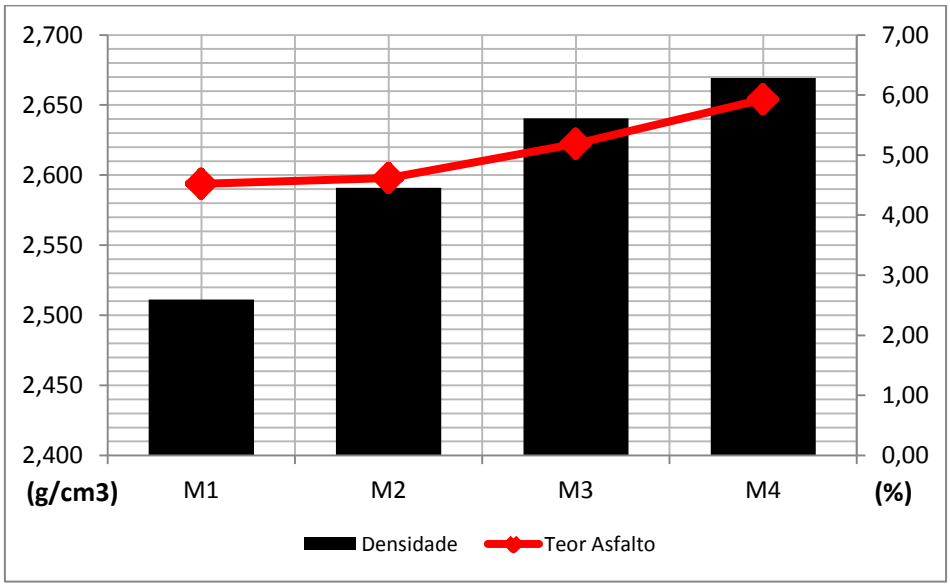
Mistura	Autor (2017) - M1	Autor (2017) - M2	Autor (2017) - M3	Autor (2017) - M4
% Agregado Siderúrgico	0%	25%	50%	75%
Ligante Utilizado	CAP 50-70	CAP 50-70	CAP 50-70	CAP 50-70
Teor de Ligante Ótimo (%)	4,52	4,62	5,19	5,93
Massa Específica Aparente (g/cm³)	2,511	2,591	2,641	2,669
Estabilidade (Kgf)	2381,91	2066,00	1894,30	1239,56
LIMITE NORMA DNIT 031/2006 (Kgf)	***Acima de 500 Kgf – Todas misturas atenderam.***			
Fluência (0,01")	4,52	5,10	3,49	5,49
RBV (%)	73,90	74,90	77,40	92,40
LIMITE NORMA DNIT 031/2006 (%)	***Entre 75% e 82% - Somente a mistura 03 atende.***			
VAM (%)	15,32	15,93	17,67	17,15
Resistência à tração - RT (MPa)	1,52	1,31	1,22	1,01
LIMITE NORMA DNIT 031/2006 (MPa)	***Acima de 0,65 MPa – Todas misturas atenderam.***			
Módulo de Resiliência - MR (MPa)	7319,75	8850,75	8367,75	6621,00
Relação MR/RT (MPa)	4828,81	6732,39	6880,72	6580,45

Fonte: Autor, 2017.

4.6.1 Resultados ensaio Marshall

As misturas asfálticas com maior percentual de neobrita apresentaram maior densidade e maior teor de ligante, em função da alta porosidade do agregado siderúrgico, porém se mantendo dentro do que é considerado padrão para teores ótimos de misturas, entre 4% e 6% (FIGURA 43).

Figura 43 - Gráfico comparativo: Densidade da Mistura *x* Teor de Ligante

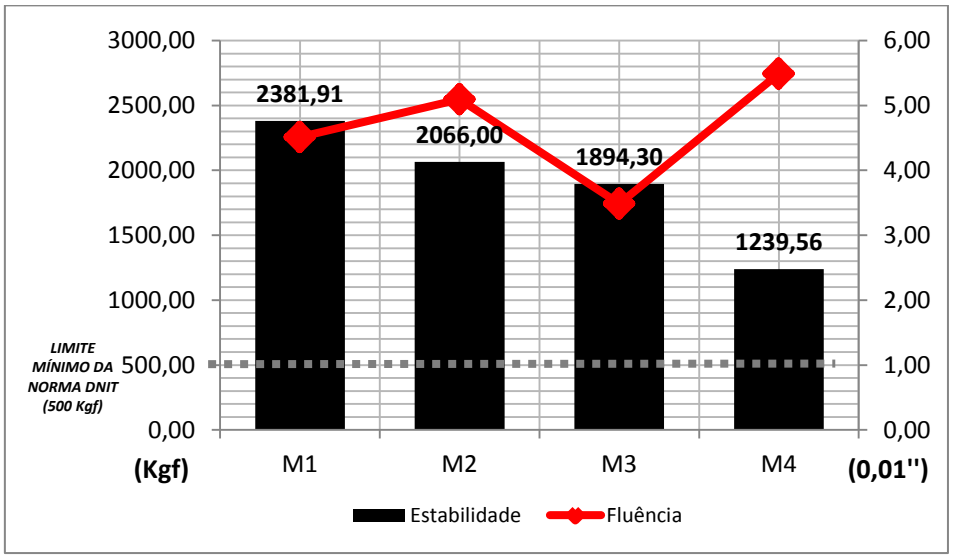


Fonte: Autor, 2017.

Tavares (2012) desenvolveu duas misturas asfálticas com 77% de agregado siderúrgico e 23% de agregado natural alterando o tipo de ligante entre elas, sendo que para a mistura com ligante CAP 30-45 obteve teor ótimo de 6,0% e para a mistura elaborada com CAP FLEXB obteve teor ideal de 7,5%. Conclui-se que, ao utilizar o agregado siderúrgico, geralmente serão encontrados percentuais maiores de ligante quando comparadas às misturas realizadas com 100% de agregados naturais, independente do ligante utilizado. Porém como comparativo, percebe-se que as misturas com agregado siderúrgico que utilizaram ligante CAP 50-70 apresentaram menor percentual de ligante ótimo, em relação aos demais ligantes utilizados por Tavares (2012).

Quanto à estabilidade Marshall, que é a máxima resistência à compressão radial, percebeu-se uma redução de capacidade de carga à medida que aumenta o percentual de neobrita na mistura asfáltica, porém todas as misturas atenderam a especificação DNIT que é de 500 Kgf. Referente à fluência Marshall, que apresenta a deformação total do corpo de prova durante o ensaio de estabilidade, a mistura 03 (50% de neobrita) apresentou menor deformação entre as misturas estudadas, inferior à da mistura 01 inclusive, moldada somente com agregados naturais (FIGURA 44).

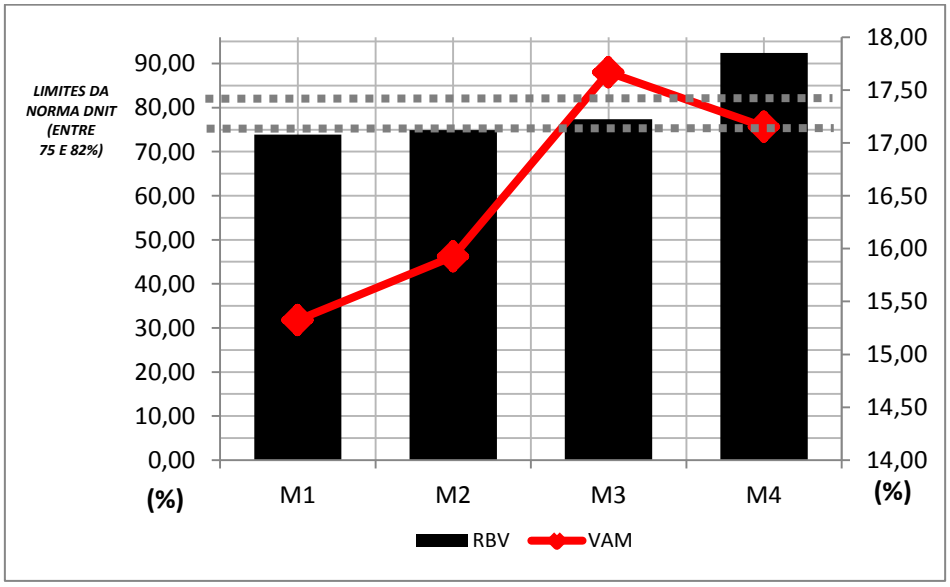
Figura 44 – Gráfico comparativo: Estabilidade Marshall *x* Fluência Marshall



Fonte: Autor, 2017.

A relação betume/vazios (RBV) e o vazio do agregado mineral (VAM) das misturas elevaram-se conforme cresceu o percentual de neobrita nas misturas, sendo que este maior número de vazios encontrado se deve ao fato da absorção de ligante pelo agregado siderúrgico (FIGURA 45).

Figura 45 - Gráfico comparativo: R.B.V. *x* V.A.M.



Fonte: Autor, 2017.

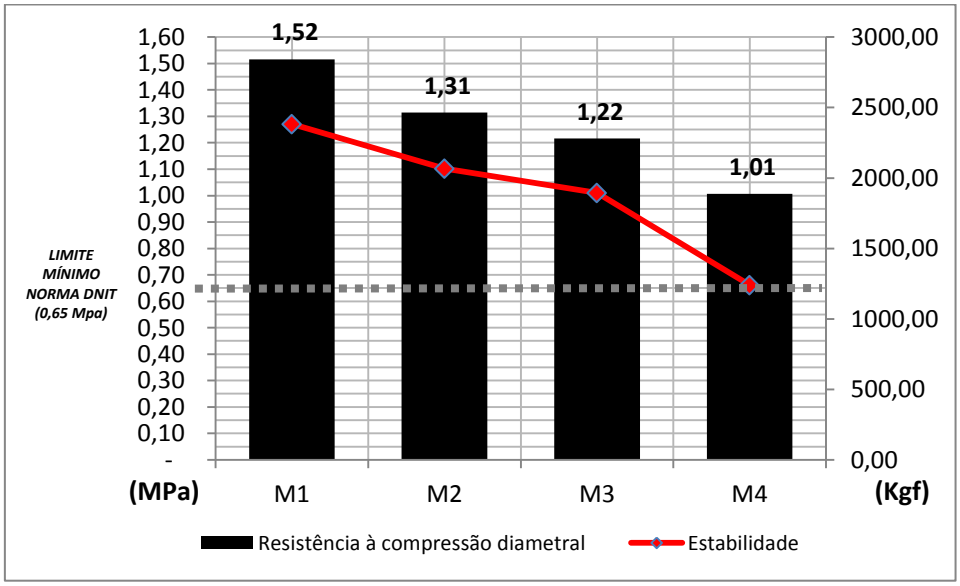
A norma DNIT 031/2006 especifica limite entre 75 e 82 g/cm³ para o R.B.V. em camadas de rolamento, sendo que neste estudo, somente a mistura 03 atendeu

este parâmetro, atingindo 77,4 g/cm³ para o R.B.V. Branco (2004) desenvolveu misturas com diferentes percentuais do mesmo agregado siderúrgico e encontrou valores entre 77 e 84,5 g/cm³, também com alguns valores acima do limite da norma DNIT que é de 82 g/cm³. A norma DNIT 031/2006 – ES, utilizada como referência, não especifica o tipo de agregado utilizado na mistura, portanto, com base nos resultados encontrados acredita-se que seria adequado existir valores específicos para o agregado siderúrgico, em uma possível revisão ou adequação desta norma do DNIT.

4.6.2 Resultados ensaio de compressão diametral

No ensaio de compressão diametral verificou-se, assim como na estabilidade Marshall, uma perda de resistência na medida em que se aumentava o percentual de neobrita nas misturas (FIGURA 46).

Figura 46 - Gráfico comparativo: Resistência à compressão diametral *x* estabilidade Marshall



Fonte: Autor, 2017.

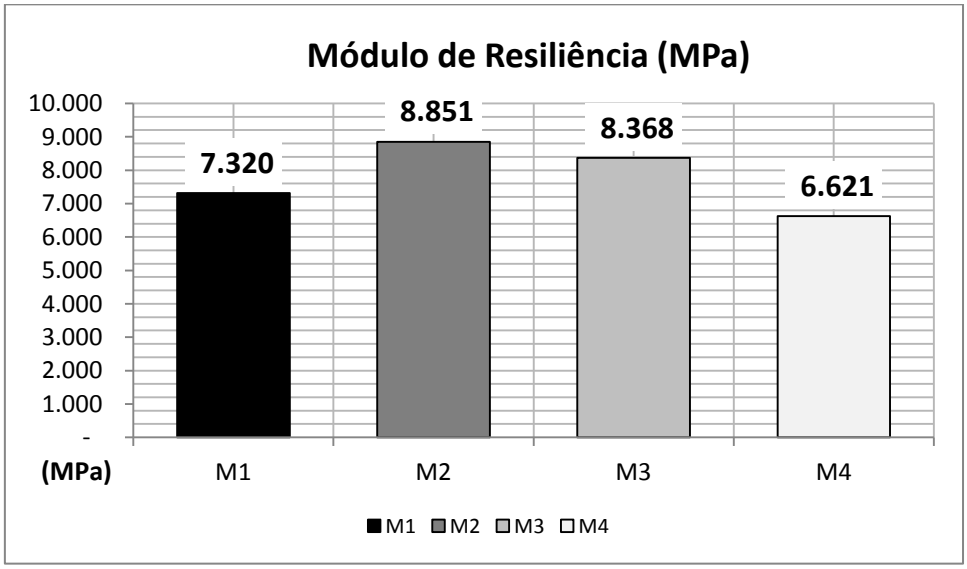
Embora a resistência das misturas com agregado siderúrgico seja menor quando comparadas ao agregado natural, todas permanecem acima da norma DNIT 031/2006 – ES, que é de 0,65 MPa. Branco (2004) faz referência com relação ao aumento de percentual de ligante nas misturas, sugerindo que, quanto maior o teor

de ligante asfáltico, menor será o intertravamento entre os agregados, reduzindo assim sua resistência.

4.6.3 Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência

Este ensaio foi desenvolvido junto ao Laboratório de Materiais da Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria/RS (UFSM), sendo que a Figura 47 apresenta os resultados para as 04 misturas desenvolvidas.

Figura 47 - Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência



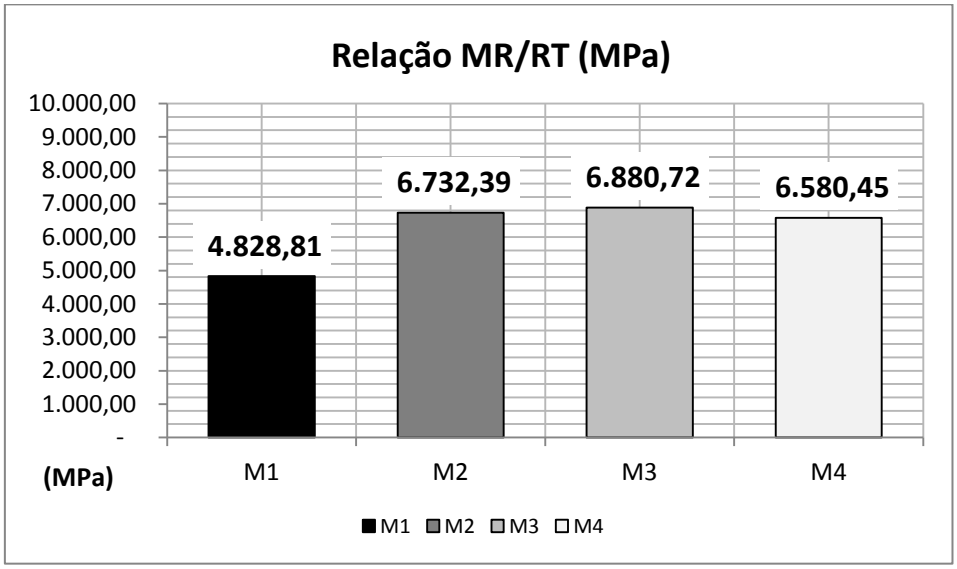
Fonte: Autor, 2017.

Nota-se que a mistura 04 apresentou o menor valor encontrado, apresentando assim maior deformação elástica que as demais misturas, sendo esta a mistura que utilizou o maior percentual de agregado siderúrgico na sua elaboração. Branco (2004) faz relação do módulo de resiliência com a quantidade de ligante, mostrando que quanto maior o teor de ligante menor o valor do módulo de resiliência, resultado este, também encontrado neste estudo.

Segundo Soares *apud* Oliveira (2003) a relação entre o módulo de resiliência (MR) e a resistência à tração (RT) estabelece um indicativo para verificação de um balanço satisfatório entre a flexibilidade e a resistência das misturas, sendo que quanto maior o valor dessa relação, pior será o comportamento da mistura em relação à fadiga. A Figura 48 mostra a relação MR/RT, sendo possível verificar que

as misturas com agregado siderúrgico apresentam valores maiores que a mistura 01 (agregado natural), mostrando então que estas misturas (02, 03 e 04) apresentam um pior desempenho quanto à fadiga.

Figura 48 - Relação MR/RT das misturas asfálticas



Fonte: Autor, 2017.

Na Tabela 43 verifica-se os resultados encontrados neste estudo, junto aos resultados de outros autores que utilizaram o mesmo tipo de escória em suas pesquisas. É possível destacar que as misturas que utilizaram o ligante CAP 50-70 (este estudo) obtiveram teor menor de ligante que as demais misturas, sendo este um importante fator econômico, enquanto que a mistura elaborada por Tavares (2012), com o ligante CAP 30-45, obteve melhores resultados quanto à resistência à tração e módulo de resiliência, mostrando-se mais resistente mecanicamente.

Tabela 43 - Resultados do ensaio de compressão diametral e módulo de resiliência de outros autores e deste estudo

Mistura	Autor (2017) - M1	Autor (2017) - M2	Autor (2017) - M3	Autor (2017) - M4	Tavares (2012)	Tavares (2012)	Branco (2004)	Branco (2004)	Branco (2004)
% Agregado Siderúrgico	0%	25%	50%	75%	75%	75%	40%	60%	80%
Ligante Utilizado	CAP 50-70	CAP 50-70	CAP 50-70	CAP 50-70	CAP 30-45	CAP FLEX-B	CAP 50-60	CAP 50-60	CAP 50-60
Teor de Ligante (%)	4,5	4,6	5,2	5,9	6,5	7,5	6,2	7,0	6,7
Resistência à tração - RT (Mpa)	1,52	1,31	1,22	1,01	2,00	0,98	0,77	0,62	0,76
Módulo de Resiliência - MR (MPa)	7320	8851	8368	6621	9031	3140	2276	1836	2188
Relação MR/RT (MPa)	4828,8	6732,4	6880,7	6580,5	4515,7	3204,1	2955,8	2961,3	2879,0

Fonte: Autor, 2017.

5 CONCLUSÃO

Após análise e avaliação dos dados referente aos ensaios desenvolvidos, aliados a pesquisa bibliográfica, pode-se concluir que:

- A alta densidade do agregado siderúrgico torna o seu transporte mais caro, visto que são taxados por peso (em toneladas), sendo mais econômico executar este tipo de mistura em obras próximas de alguma usina fornecedora deste tipo de agregado;
- A utilização de escória de aciaria elétrica eleva os percentuais de teor de projeto, por consequência da sua alta porosidade e absorção;
- A utilização da escória de aciaria elétrica em misturas asfálticas do tipo CBUQ fornecem propriedades de resistência (estabilidade e resistência à tração) que atendem a norma DNIT 031/2006 – ES, porém os valores obtidos apresentaram-se menores se comparados a mistura 01 (100% agregados naturais);
- Misturas asfálticas com 100% de agregados siderúrgicos não se enquadram na Faixa C – DNIT, por carência de material fino (a partir da peneira nº 4), devendo ser complementadas por outros materiais na granulometria miúda;
- A mistura 03, com 50% de neobrita e 50% de pó de pedra, foi a única que atendeu todos os parâmetros da norma DNIT 031/2006 – ES, sendo eles a relação betume/vazios entre 75 e 82%, a estabilidade Marshall acima de 500 Kgf e a resistência à tração por compressão diametral acima de 0,65 Mpa;
- Misturas com agregado siderúrgico apresentaram valores maiores na relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração, mostrando um pior desempenho à fadiga, em comparação com misturas convencionais.

Comprova-se, portanto, que há uma opção no mercado para substituição da brita convencional na composição de misturas asfálticas em obras rodoviárias, que além de atender as propriedades mecânicas estabelecidas em norma, oferece vantagens tanto financeiras quanto ao meio ambiente.

Para fins de uma breve comparação financeira, o valor de venda do agregado siderúrgico utilizado para esta pesquisa é de R$ 11,40/ton (preço atual da empresa que viabilizou o material deste estudo), comparados a R$ 35,00/ton da brita natural (brita 3/4", 3/8” e pó de pedra, preço atual de uma empresa do Vale do Taquari - Rio Grande do Sul).

Por fim, vale salientar que as normas DNER referem-se às escórias em geral e datadas de mais de 20 anos atrás (1994 e 1997), podendo elas ser de aciaria elétrica ou alto forno, que por sua vez apresentam características e composições distintas. Acredita-se ser necessário avaliar e estabelecer novos limites de resistência à abrasão, densidade e absorção de água para cada tipo de escória utilizada.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar misturas com escória proveniente de alto forno, que segundo Branco (2004) é mais lisa e menos porosa que a escória de forno elétrico (este estudo), utilizando os mesmos métodos, percentuais e faixa granulométrica “C”, para fins comparativos;
- Utilizar outros materiais finos para completar a escassez de finos da escória, substituindo o pó de brita por algum outro material sustentável, como por exemplo, a areia artificial (cinza pesada) que é um material fino, um subproduto gerado em termelétricas, durante a queima do carvão fóssil, sendo que, assim como a escória, não há uma destinação adequada;
- Realizar comparativo de custos de execução entre o CBUQ elaborado com agregados naturais e com o siderúrgico, considerando um projeto real de implantação de rodovia a ser executada;
- Analisar o desempenho mecânico de misturas com escória quando executadas em pista.

REFERÊNCIAS

ABEDA - **Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos**. Disponível em: <http://www.abeda.org.br>. Acesso em: 30 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Resolução ANP nº 19/2005.** Disponível em <http:// http://www.abeda.org.br/legislacao/RESOLUCAO-NR-19.pdf>. Acesso em: 23 set. 2016.

AHMEDZADEA, Perviz e SENGOZB, Burak. **Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete**. Revista *Journal of Hazardous Materials*, Turquia, ed. 165, jun. 2009 (pág. 300–305). Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science/journal/03043894/165/1 >. Acesso em: 23 fev. 2017.

ARAÚJO, Marcelo Almeida*; et. al*. **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento, ANO 1. VOL. 10. Novembro de 2016.

ARCELORMITTAL - Tubarão . Escória de aciaria LD. **Catálogo de produtos**. Tubarão – SC. 2015. Disponível em: <http://tubarao.arcelormittal.com/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_aciaria_ld/ld_np.asp> Acesso em: 10 mai. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5019**: Produtos e Ligas de Cobre -Terminologia. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Ángeles". Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12891**: Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16273**: Misturas asfálticas — Propriedades volumétricas de concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2014.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 2041: **Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures**. USA, 2000.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Légi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 2008.

BRANCO, V. T. F C. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: < http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2004/Teses/BRANCO_VTFC_04_t_M_geo.pdf >. Acesso em: 11 mai. 2016.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 035**: **Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos.** Especificação de Material. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035**: **Agregado – determinação da abrasão "Los Angeles".** Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043**: **Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 81: Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083**: **Agregados – análise granulométrica.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 086**: **Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 117**: **Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 199**: **Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.** Procedimento. Rio de Janeiro: DNER, 1996.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 262: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários.** Especificação de Material. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 263: Emprego de escórias de aciaria para pavimentos rodoviários.** Procedimento. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 306: Pavimentação - imprimação.** Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 307: Pavimentação – pintura de ligação. Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro: DNER, 1997.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 313: Pavimentação – concreto betuminoso.** Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031-ES: Pavimentos flexíveis -Concreto asfáltico**. Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135-ME: Determinação do módulo de resiliência**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136-ME: Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT: MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**. 3ª ed. IPR. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

CLAÚDIO, Luiz. PALARETO, Matheus. **Relatório de Física e Química – Densidade.** Colégio Lacordaire Sant'Anna, Ribeirão Preto, abr. 2013.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias 2014**. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Acesso em: 29 abr. 2016.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias 2015**. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Acesso em: 29 abr. 2016.

CST - **Companhia Siderúrgica de Tubarão**. Disponível em: <www.cst.com.br>. Santa Catarina, 2014. Acesso em 15/05/2016.

FARRAND, B. e J. EMERY. **Recent Improvements in Quality of Steel Slag**

Aggregate. Publicado por Transportation Research Board sob nº 1486. EUA, 1995. Disponível em <https://trid.trb.org/view.aspx?id=451881>. Acesso em 21/07/2016.

FREITAS, H. B. **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado.** 2007. Tese (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: < http://livros01.livrosgratis.com.br/cp029299.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2016.

FUSINATO, Joni. **Estudo da viabilidade técnico-ambiental para incorporação da escória férrica na pavimentação asfáltica como agregado miúdo**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: < https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87765/227770.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 mai. 2016.

GEYER, Rejane M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: < https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1508/000300433.pdf?sequence=1 >. Acesso em: 01 mai. 2016.

GEYER, Rejane M. T *et al*. **Escórias Siderúrgicas: caracterização e aplicações para a Indústria da Construção Civil.** No: 25º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS E RESÍDUOS NA SIDERURGIA. Volta Redonda-RJ, 1994.

Instituto Aço Brasil. Disponível em: <www.acobrasil.org.br>. São Paulo, 2016. Acesso em 25/06/2016.

KEHAGIA, Fotini. **Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates.** Publicado por SAGE Journals, Vol 27. EUA, 2009. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0734242X08092025 >. Acesso em 20/07/2016.

LOTURCO, Bruno. **Pavimento Rígido**. Revista Téchne, São Paulo, ed. 102, set. 2005. Disponível em: < http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/102/artigo286026-1.aspx>. Acesso em: 06 mai. 2016.

MOURA, Washington A. **Utilização da escória de cobre como adição e como agregado miúdo ao concreto**. Tese (Doutorado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: < http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/15992 >. Acesso em: 20 abr. 2016.

NAKAMURA, Juliana. **Pavimentação asfáltica**. Revista Infraestrutura Urbana, São Paulo, ed. 16, dez. 2011. Disponível em: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/pavimentacao-asfaltica-os-tipos-de-revestimentos-o-maquinario-necessario-260588-1.aspx>. Acesso em: 04 mai. 2016.

OLIVEIRA, Luiz C. P. **Produção de Agregado Siderúrgico**. Multiserv – Harsco Corporation, Sapiranga, jun. 2010.

RAMOS, Fernando Machado. PORTAL METALICA, **Da aciaria para o pavimento**. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/da-aciaria-para-o-pavimento.aspx>. Porto Alegre, 2016. Acesso em: 06 mai. 2016.

ROCHA, Fabiano L. L. **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial.** Dissertação (Mestrado) – Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2336. Acesso em: 26 abr. 2016.

RODRIGUES, Gisele L. C. **Caracterização e Avaliação da Expansibilidade de Escória de Aciaria LD Não Tratadas e Tratadas.** Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007. Disponível em: < http://livros01.livrosgratis.com.br/cp043365.pdf >. Acesso em: 20 abr. 2016.

ROHDE, L., **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos - Estudo Laboratorial.** Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: < https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3878/000345108.pdf?sequence=1 >. Acesso em: 23 mai. 2016.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. ampl. São Paulo: PINI, 2008.

SILVA, E. A. e MENDONÇA, R. L.. **Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento.** Revista Engenharia Ciência e Tecnologia 4, no. 2, 2001.

SILVA, Paulo Fernando A. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 2. ed. rev. São Paulo: PINI, 2008.

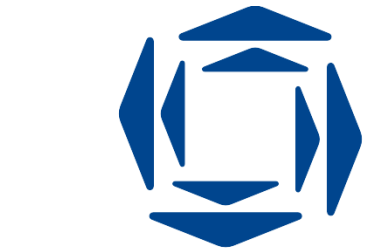
SOARES, J.B.; *et al*. **Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ.** 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, 2000.

SOUSA, Gustavo M., **Estudo Experimental de Escórias de Aciaria para Fins de Caracterização Tecnológica como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas.** Dissertação (Mestrado) – Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. Disponível em: < http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=180848>. Acesso em: 12 mai. 2016.

TAVARES, Diogo S. **Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico.** Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: < http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=2030 >. Acesso em: 05 mai. 2016.

VASCONCELOS, Kamilla L.. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias.** Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004. Disponível em: < http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4902/1/2004_dis_klvasconcelos.pdf >. Acesso em: 12 mai. 2016.

VIANNA, Ilca Oliveira de Almeida. **Metodologia do trabalho científico: um enfoque didático da produção científica.** São Paulo: EPU, 2001.



Rua Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900-000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09