

UFES - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

BRUNA DA SILVA CAJAIBA

JULIA RODRIGUES BARBOSA DE SOUSA PAULA

**ESTUDO DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA CAMADA POROSA
DE ATRITO (CPA) CONTENDO ESCÓRIA DE ACIARIA LD COMO AGREGADO**

VITÓRIA,

2022.

BRUNA DA SILVA CAJAIBA

JULIA RODRIGUES BARBOSA DE SOUSA PAULA

**ESTUDO DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA CAMADA POROSA
DE ATRITO (CPA) CONTENDO ESCÓRIA DE ACIARIA LD COMO AGREGADO**

Projeto de Graduação apresentado
ao curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito parcial à
obtenção do grau de Bacharel.

Orientador: Prof.^a Ph.D. Jamilla Emi
Sudo Lutf Teixeira

Coorientador: Prof. Dr. Patrício José
Moreira Pires

VITÓRIA,

2022.

BRUNA DA SILVA CAJAIBA

JULIA RODRIGUES BARBOSA DE SOUSA PAULA

**ESTUDO DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA CAMADA POROSA
DE ATRITO (CPA) CONTENDO ESCÓRIA DE ACIARIA LD COMO AGREGADO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal do Espírito Santo como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof.^a Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Dr. João Paulo Meneses
Examinador Externo

VITÓRIA, 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus por nos permitir essa realização, nos dar força e sabedoria durante a graduação.

Aos nossos queridos pais e familiares, que nos apoiaram e incentivaram durante toda formação. Por todo amor, carinho e compreensão por eles oferecidos, que foram fundamentais para a conclusão desse projeto.

Aos nossos amigos e colegas de graduação, pelas alegrias e dificuldades compartilhadas nessa trajetória e por tornarem os momentos mais leves e divertidos.

A nossa orientadora, a professora Ph.D. Jamilla Teixeira, agradecemos por sempre nos incentivar e acreditar no nosso trabalho, por sua paciência, dedicação e sabedoria nas orientações e por ser para nós um exemplo de profissional.

Ao nosso coorientador professor Dr. Patrício Pires por seu empenho na pesquisa e sua disponibilidade.

Nosso agradecimento aos técnicos Sidineidy e Carolina, do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES, por nos auxiliarem em todos os ensaios laboratoriais desse trabalho, por sua generosidade e por compartilharem seus conhecimentos conosco.

Agradecemos também a parceria entre ArcelorMittal e UFES, por disponibilizarem o agregado que utilizamos neste trabalho e pela parceria durante toda a execução.

Por fim, agradecemos a todos que de alguma forma nos ajudaram a atingir essa conquista.

RESUMO

CAJAIBA, Bruna da Silva; PAULA, Julia Rodrigues Barbosa de Sousa. **Estudo de dosagem de misturas asfálticas para camada porosa de atrito (CPA) contendo escória de aciaria LD como agregado.** 2022. Projeto de Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2022.

As condições precárias da malha rodoviária brasileira contribuem para os altos índices de acidentes nas estradas. Manifestações patológicas na via são problemas comuns, que são ocasionados devido às ações repetitivas do tráfego, a falta de manutenção, excesso de água no pavimento, problemas na geometria da via, somados a imprudência humana. Com a forte ocorrência de chuvas no Brasil, os pavimentos impermeáveis, predominantemente utilizados, contribuem para a ocorrência de aquaplanagem, de espelho d'água noturno e redução da aderência pneu pavimento, aumentando os riscos de acidentes. A Camada Porosa de Atrito (CPA) é uma alternativa para diminuir os efeitos causados pelo acúmulo de água nas pistas e uma solução ambiental relacionada ao aumento da recarga de água subterrânea. Os estudos sobre CPA no Brasil ainda são poucos, sendo um fator limitante a necessidade de se utilizar agregados com alta resistência a abrasão. O uso de agregados alternativos, como a escória de aciaria, em substituição dos agregados naturais pode ser uma alternativa, dado que o desgaste sofrido pela carga abrasiva nesse material é quase a metade, quando comparado ao agregado natural. Além disso, a escória LD possui boas características e a vantagem de ser um coproduto da produção do aço, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e nos custos do projeto. O presente trabalho visa avaliar a viabilidade do uso de escória de aciaria do tipo LD na produção de CPA. Foi feito um estudo de dosagem em misturas com e sem substituição total de agregados naturais por escória LD. Os principais ensaios requeridos para dosagem de CPA foram realizados, tais como resistência ao desgaste Cântabro, permeabilidade, resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e escorrimento do ligante asfáltico. Os resultados laboratoriais mostraram que a substituição do agregado natural pela escória em estudo melhora as características

de permeabilidade da mistura, porém os resultados mecânicos não foram satisfatórios, sendo necessário novos estudos para otimização do uso do material.

Palavras-chave: Concreto poroso asfáltico; Escória LD; Permeabilidade; Misturas Asfálticas.

ABSTRACT

The precarious conditions of the Brazilian road network contribute to the high rates of accidents on the roads. Pathological manifestations on the road are common problems, which are caused due to repetitive traffic actions, lack of maintenance, excess water on the pavement, problems in the geometry of the road, added to human recklessness. With the heavy occurrence of rain in Brazil, waterproof pavements, predominantly used, contribute to the formation of aquaplaning, night water mirror and reduction of tire adhesion to the pavement, increasing the risk of accidents. The Open Graded Friction Course (OGFC) is an alternative to reduce the effects caused by the accumulation of water on the slopes and an environmental solution related to the increase of groundwater recharge. Studies on OGFC in Brazil are still few, and a limiting factor is the need to use aggregates with high abrasion resistance. The use of alternative aggregates, such as steel slag, in place of natural aggregates can be an alternative, given that the wear suffered by the abrasive load in this material is almost half when compared to natural aggregate. In addition, LD slag has good characteristics and the advantage of being a co-product of steel production, contributing to the reduction of environmental impacts and project costs. The present work aims to evaluate the feasibility of using LD-type steel slag in the production of CPA. A dosage study was carried out in mixtures with and without total replacement of natural aggregates by LD slag. The main tests required for CPA dosage were performed, such as: Cantabro abrasion resistance, binder draindown, indirect tensile strength (IDT) and permeability tests. The laboratory results showed that the replacement of the natural aggregate by the slag under study improves the permeability characteristics of the mixture, however the mechanical results were not satisfactory, being further studies are needed to optimize the use of the material.

Keywords: Porous asphalt concrete; LD slag; Permeability; Asphalt Mixtures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Total de acidentes em rodovias federais - 2015 a 2021.....	15
Figura 2 - Princípio de funcionamento da CPA.....	18
Figura 3 - CPA executado no Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro. a) Vista geral; b) Textura superficial.....	21
Figura 4 - Aspectos dos tipos de vazios em seção de um revestimento drenante.....	22
Figura 5 - Esquema do experimento realizado por Darcy.....	25
Figura 6 - Comparação da durabilidade e permeabilidade das graduações A, B e C...	27
Figura 7 - Faixas granulométricas utilizadas.....	27
Figura 8 - Graduação utilizada na mistura.....	29
Figura 9 - Volume de vazios em relação aos teores de ligante.....	30
Figura 10 - Resultados de porosidade e permeabilidade.....	31
Figura 11 - Fluxo simplificado de produção do aço.....	33
Figura 12 - Sequência de operação do conversos a oxigênio tipo LD ou BOF (a) Carregamento da sucata; (b) Carregamento do ferro gusa líquido; (c) Sopro de oxigênio; (d) Vazamento do aço; (e) Vazamento da escória de aciaria no pote de escória.....	34
Figura 13 - Fluxograma sobre a expansão do CaO e MgO.....	37
Figura 14 - Planejamento Experimental.....	38
Figura 15 - CAP 30/45 utilizado.....	40
Figura 16 - Amostra de escória LD utilizada.....	41
Figura 17 - Amostra de agregado natural utilizada.....	41

Figura 18 - Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol (a) Equipamento Saybolt-Furol; (b) Orifício após a sua abertura e início da contagem do tempo; (c) Momento precedente ao do líquido atingir a marca de 60 ml.....	43
Figura 19 - Ensaio de Penetração (a) Penetrômetro; (b) Amostra submetida a banho d'água; (c) Amostra com a agulha ajustada na sua superfície.....	44
Figura 20 - Ensaio de Determinação do Ponto de Amolecimento a) Amostras; b) Equipamento anel e bola com amostra encaixada; d) Equipamento anel e bola em banho; e) Momento que as esferas tocam a placa referência.....	45
Figura 21 - Realização do ensaio de adesividade (a) Amostra seca; (b) Adição do ligante ao agregado e mistura; (c) Mistura entre ligante e agregados; (d) Mistura submersa em água destilada; (e) Mistura após as 72 horas submersa em água.....	47
Figura 22 - Procedimentos do Ensaio de Abrasão Los Angeles. (a) Material peneirado e retido nas peneiras de 12,5mm e 9,5mm; (b) Agregados inseridos na Máquina Los Angeles; c) Máquina Los Angeles.....	48
Figura 23 - Amostra em banho térmico com o extensômetro ajustado.....	50
Figura 24 - Dosagem (a) Agregado natural sendo pesado; (b) Pesagem do ligante; (c) Mistura dos materiais; (d) CP sendo retirado do molde; (e) CP pronto.....	53
Figura 25 - Misturas asfálticas propostas.....	53
Figura 26 - Verificação do índice de vazios; (a) CP revestido com fita adesiva; (b) CP sendo banhado por parafina; (c) CP envolvido por parafina; (d) CP submerso em água.....	55
Figura 27 - Cesta especificada pela norma ASTM D6390 para a realização do ensaio de escorrimento.....	57
Figura 28 - Realização do ensaio de escorrimento (a) Mistura dentro da cesta; (b) Amostra dentro da estufa; (c) Escorrimento do ligante.....	58
Figura 29 - Equipamento Los Angeles utilizado para realizar o ensaio Cântabro.....	59

Figura 30 - CP antes (esquerda) e depois (direita) da realização do ensaio Cântabro.	59
Figura 31 - Equipamentos usados no ensaio de permeabilidade (a) Sistema para realização do ensaio de permeabilidade; (b) Reservatório.....	61
Figura 32 - Preparação da amostra (a) Corpo de prova vedado com fita isolante; (b) CP envolto com duas camadas de impermeabilizante; (c) Amostra inserida no PVC; (d) Amostra com parafina cobrindo suas extremidades.....	62
Figura 33 - Ensaio de RTCD (a) CP ajustado na prensa; (b) CP rompido.....	63
Figura 34 - Resultado do ensaio de adesividade da escória LD.....	67
Figura 35 - Corpo de prova produzido com escória LD (esquerda) e com agregado natural (direita).....	70
Figura 36 - Diferença visual apresentada pelas amostras de LD utilizadas (a) Amostra usada para os ensaios de caracterização e (b) Amostra usada para a confecção dos CPs.....	76
Figura 37 - Pátio de armazenagem das escórias.....	77
Figura 38 - Resultados do Ensaio de Adesividade (a) Amostra caracterizada no início do estudo; (b) Amostra de agregado que foram produzidos os corpos de prova.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para aceitação da camada porosa.....	19
Tabela 2 - Resultados do ensaio de resistência a abrasão.....	23
Tabela 3 - Graduações OGFC usadas para o estudo.....	26
Tabela 4 - Valores da permeabilidade para as três graduações.....	26
Tabela 5 – Propriedades físicas dos agregados.....	29
Tabela 6 - Ranking de produção mundial de aço em 2020.....	32
Tabela 7 - Resultados de FRX da escória LD.....	36
Tabela 8 - Valores de Massa específica, absorção e resistência a abrasão de estudos anteriores.....	37
Tabela 9 – Faixa de valores desejáveis de propriedades físicas das escórias de aciaria.....	38
Tabela 10 - Especificações do CAP 30/45 utilizado na pesquisa.....	39
Tabela 11 - Faixa granulométrica conforme DNER-ES 386 (1999) e faixa adotada.....	51
Tabela 12 - Composição granulométrica da Faixa Teste para ensaio de permeabilidade.....	52
Tabela 13 - Resultado dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico.....	64
Tabela 14 - Caracterização da escória LD e do agregado natural.....	65
Tabela 15 - Teores ótimos de projeto e parâmetros volumétricos das misturas.....	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de Viscosidade do CAP 30/45 utilizado.....	65
Gráfico 2 - Curva Granulométrica da escória LD.....	67
Gráfico 3 - Volume de vazios em função do teor de ligante testados para as misturas contendo escória LD.....	68
Gráfico 4 - Volume de vazios em função do teor de ligante testados para as misturas contendo agregado natural.....	68
Gráfico 5 - Resultados de “K” para as misturas estudadas.....	71
Gráfico 6 - Desgaste Cântabro das misturas ensaiadas.....	73
Gráfico 7 - Resultados de resistência à tração das misturas ensaiadas.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
AMP	Asfalto Modificado por Polímeros
BC	Binder Content
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório Superpave
CP	Corpos de prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento de Infraestrutura e Transportes
DRX	Difração de Raios-X
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
FRX	Fluorescência de Raios-X
LD	<i>Linz-Donawitz</i>
OAC	<i>Optimum Asphalt Content</i>
OGFC	<i>Open Graded Friction Course</i>
PVC	Policloreto de Vinila
RT	Resistência à Tração
RTCD	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SBS	<i>Styrene-Butadiene-Styrene</i>
SC	Slag Content

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. CAMADA POROSA DE ATRITO	18
2.1.1. Histórico e Utilização	20
2.2. PROPRIEDADES	21
2.2.1. Volume de Vazios	21
2.2.2. Desgaste Cântabro	22
2.2.3. Escorrimento	23
2.2.4. Permeabilidade	24
2.3. ESTUDOS DE CPA COM UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA	28
2.4. PROCESSO SIDERÚRGICO	32
2.4.1. Formação da Escória de Aciaria LD	34
2.5. ESCÓRIA DE ACIARIA	35
3. METODOLOGIA	38
3.1. MATERIAIS	39
3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	39
3.1.2. Agregados	40
3.2. MÉTODOS	41
3.2.1. Caracterização dos Materiais	41
3.2.1.1. Parâmetros Gerais.....	41
3.2.1.2. Caracterização do Ligante Asfáltico.....	42
3.2.1.3. Caracterização dos Agregados.....	45
3.2.2. Caracterização das Misturas Asfálticas	51
3.2.2.1. Dosagem SuperPave.....	51
3.2.2.2. Misturas Propostas.....	53
3.2.2.3. Determinação do volume de vazios.....	54
3.2.2.4. Escorrimento do Ligante Asfáltico.....	56
3.2.2.5. Desgaste Cântabro.....	58

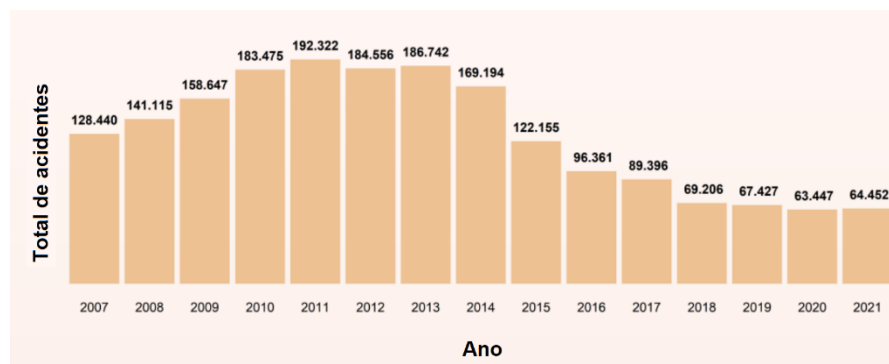
3.2.2.6. Ensaio de Permeabilidade.....	60
3.2.2.7. Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	63
4. RESULTADOS	64
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO.....	64
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	65
4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	67
4.3.1. Dosagem das Misturas Asfálticas.....	67
4.3.2. Escorrimento do Ligante Asfáltico	70
4.3.3. Ensaio de Permeabilidade	71
4.3.4. Desgaste Cântabro.....	72
4.3.5. Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	74
4.3.6. Verificação da qualidade da escória LD utilizada	75
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais, com uma malha rodoviária de aproximadamente 1.720.000 km de extensão (CNT, 2018). O transporte rodoviário é o principal meio de deslocamento de pessoas e mercadorias, correspondendo a 61% no transporte de mercadorias e 95% do de passageiros. Por isso, um sistema de estradas eficiente é fundamental. Com o avanço da urbanização, houve um crescimento rápido e desordenado das cidades, levando a uma ocupação do solo sem planejamento. Diante desse cenário, apenas 12,4% das rodovias brasileiras são pavimentadas e, dessa porcentagem, 99% é constituída por pavimento asfáltico (CNT, 2019).

A grande maioria dessas estradas encontra-se em péssimo estado e conservação resultando em falta de segurança viária à motoristas e pedestres, contribuindo para os altos índices de acidentes rodoviários. Segundo o CNT (2022), esse índice aumentou 1,6% em 2021 em relação a 2020, totalizando um aumento de ocorrências de 63.447 para 64.452 casos, conforme apresentado na Figura 1. Isto se deve a problemas como má sinalização das vias, traçado geométrico inadequado e imprudência humana associados às condições estruturais da via. Manifestações patológicas como afundamentos de trilha de roda, trincas e buracos na via são problemas estruturais comuns, que são ocasionados devido às ações repetitivas do tráfego, falta de manutenção, excesso de água no pavimento, escolha inadequada de materiais, dentre outros fatores.

Figura 1 - Total de acidentes em rodovias federais - 2015 a 2021



Fonte: Adaptado de CNT (2022)

Os pavimentos impermeáveis, predominantemente utilizados, contribuem para a ocorrência de aquaplanagem, de espelho d'água noturno, redução da aderência pneu pavimento, e aumentam ainda mais os riscos de acidentes. Somado a isso, tem os prejuízos ambientais, pois a falta de permeabilidade nos solos tem como consequência o aumento do escoamento superficial e redução da infiltração da água no solo, que prejudica o abastecimento das águas subterrâneas e causa alagamentos e inundações (MENEZES, 2017; EDWARDS, 2002).

Uma alternativa encontrada para diminuir os efeitos causados pelo acúmulo de água nas pistas é a utilização da Camada Porosa de Atrito (CPA), ou na literatura internacional como Open Graded Friction Course (OGFC), tipo de revestimento asfáltico com alta permeabilidade, que também é uma solução ambiental relacionada ao aumento da recarga de água subterrânea (MAIA et al., 2019; AHN et al., 2021; JACQUES, 2018 e ARAUJO et al., 2000). A aplicação desses revestimentos assegura qualidade das vias, além de conforto e segurança aos motoristas.

Os estudos sobre CPA no Brasil ainda são poucos, sendo um fator limitante a necessidade de se utilizar agregados com alta resistência ao desgaste. A norma ASTM D7064/D7064M (2021) recomenda que agregados para utilização em CPA devem apresentar entre outras características, valores de desgaste por abrasão Los Angeles inferiores à 30%. No Espírito Santo, no entanto, grande parte dos agregados locais apresentam valores de resistência ao desgaste por abrasão Los Angeles superiores à 30%, como pode ser observado nas pesquisas de Teixeira et al. (2019) e Moura et al. (2020), entre outros.

O uso de agregados alternativos, como os resíduos siderúrgicos, em substituição dos agregados naturais locais, pode ser uma solução técnica e ambientalmente correta. Destaca-se, nesse trabalho, o uso de escória de aciaria do tipo LD (*Linz-Donawitz*). O desgaste sofrido pela carga abrasiva no ensaio padronizado pela DNER-ME 383 (1999) nesse material é quase a metade, quando comparado ao agregado natural (Moura et al., 2020). Além disso, a escória LD possui alta adesividade ao ligante asfáltico, o que pode resultar numa melhor resistência ao dano por umidade induzida do material. Dessa forma, do ponto de vista técnico, a

escória de aciaria LD é um material promissor a ser aplicado em misturas asfálticas a serem empregadas em locais onde a ocorrência de chuvas é intensa, como no Brasil. Além disso, seu uso em substituição ao agregado natural também pode contribuir para a redução dos impactos ambientais de extração de agregados naturais e deposição de escória em aterros e nos custos do projeto (TEIXEIRA et al., 2019; KIM et al., 2018).

Visando contribuir para o estudo sobre CPA, este projeto de graduação se propõe verificar a possibilidade de se usar escória de aciaria em misturas asfálticas porosas, devido a suas características promissoras do material para esta aplicação. Além da resistência ao desgaste, sua boa adesividade ao ligante, se comparado aos agregados naturais de origem granítica com predominância no estado do Espírito Santo, diminuiria possíveis danos por umidade no concreto drenante.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica de aplicação de escória LD como agregado na camada porosa de atrito, como substituto do agregado convencional, através do estudo de dosagem de CPA com base nas normativas nacionais e internacionais vigentes.

1.1.2 Objetivos Específicos

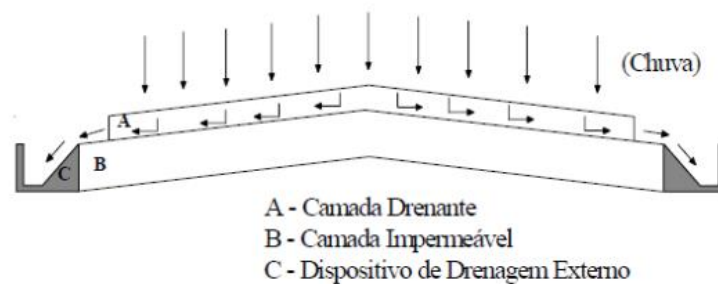
- Realizar os ensaios de caracterização em amostras de escória de aciaria do tipo LD para verificar o atendimento à norma ASTM D7064/D7064M (2021);
- Realizar estudo de dosagem de CPA com e sem substituição total de agregado natural por LD;
- Avaliar o escoamento e o desgaste Cântabro das misturas asfálticas estudadas para definição do teor ótimo de ligante das misturas conforme norma ASTM D7064/D7064M (2021);
- Avaliar a permeabilidade de misturas asfálticas porosas compactadas e a resistência à tração por compressão diametral para verificar, respectivamente, a funcionalidade e a resistência do CPA.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CAMADA POROSA DE ATRITO

As misturas asfálticas porosas possuem diversas aplicações na pavimentação. Quando usadas como camada de desgaste colocada sobre uma estrutura convencional de asfalto denso, sem possuir função estrutural, recebem o nome de camada porosa de atrito (CPA), seu funcionamento está exposto na Figura 2 (VIRGILIIS, 2009; PINHEIRO, 2004). Bernucci et al. (2008) afirma que a camada inferior à CPA deve ser necessariamente impermeável, evitando o comprometimento da estrutura do pavimento pela infiltração de água nas camadas de suporte do pavimento .

Figura 2 - Princípio de funcionamento da CPA



Fonte: Virgiliis (2009)

A norma DNER-ES 386 (1999) define CPA como pré-misturado a quente com asfalto modificado por polímero, executado em usina apropriada, com características específicas, constituído de agregados, material de enchimento (fíler) e cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero do tipo SBS, espalhada e comprimida a quente. A norma ainda estabelece cinco faixas granulométricas, teor de ligante variando de 4 a 6%, além de definir parâmetros volumétricos e mecânicos para aceitação do CPA, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Critérios para aceitação da camada porosa

Características	Camada Porosa
Porcentagem de vazios	18 a 25
Desgaste à Abrasão Los Angeles – Ensaio Cântabro, % máximo	25
Resistência à tração por compressão diametral a 25°C, kgf/cm ² , mínimo	55

Fonte: DNER (1999)

Segundo Castro (2005), a elevada quantidade de agregados graúdos proporciona a misturas asfálticas porosas as seguintes vantagens:

- Eliminação do fenômeno da hidroplanagem: a camada drenante absorve e elimina a água precipitada sobre a superfície do pavimento;
- Maior resistência ao deslizamento sobre pavimentos molhados: o CPA apresenta alta macrotextura, conferindo uma elevada aderência entre o pneu e o pavimento a altas velocidades;
- Redução da pulverização de água com a passagem dos veículos: a água é absorvida pela camada drenante através de seus vazios, evitando que a água seja borrifada com a passagem dos veículos;
- Menor deslumbramento pelas luzes dos veículos: a superfície livre de água evita o efeito de reflexão dos faróis dos veículos, promovendo a segurança e visibilidade do condutor;
- Redução do ruído do tráfego: como a CPA drena a água presente no pavimento, o barulho causado com a água sendo borrifada pela passagem dos carros é minimizado.

Em contrapartida, por apresentarem elevada porosidade, as misturas asfálticas porosas apresentam algumas limitações. A primeira que pode ser listada é a durabilidade. A elevada porcentagem de vazios pode favorecer a ação do dano por umidade, acarretando o desprendimento da película betuminosa da superfície dos agregados, além de favorecer a oxidação do ligante, resultando em envelhecimento da mistura. Outra limitação é a colmatação dos poros. Com o tempo, os vazios presentes na camada porosa são preenchidos por detritos e afins, que comprometem a sua função drenante (CASTRO, 2005; NIELSEN, 2007). O custo também é um

empecilho para aplicação dessa mistura, pois a presença de um asfalto modificado por polímero e que apresenta agregados de qualidade superior podem dobrar o custo do revestimento drenante (CAMPOS, 1998; VIRGILIIS, 2009). No entanto, as normativas estrangeiras não limitam a dosagem de CPA com uso de ligante modificado por polímero.

2.1.1. Histórico e Utilização

As misturas asfálticas com granulometria aberta, aplicadas, majoritariamente, sobre uma camada asfáltica já existente, começaram a ser desenvolvidas a partir da década de 60 (DUMKE, 2005).

Nos Estados Unidos, o uso de misturas asfálticas porosas se iniciou na década de 70, no estado de Oregon. Neste mesmo período, países da Europa, além do Japão e da África do Sul, iniciaram testes com CPA, produzindo os primeiros trechos experimentais, com espessura de aproximadamente 4 cm (DUMKE, 2005; KANDHAL, 2002).

A França teve destaque por ser um dos primeiros países europeus a utilizar CPA, mais precisamente no ano de 1977. Em 1978, foi lançado na França um projeto de pesquisa que visava promover soluções para os problemas de inundações, e o pavimento permeável ganhou foco entre as soluções levantadas (BOTTEON, 2017).

Na Espanha, ao fim da década de 70 e início da década de 80, foram construídos quatro trechos experimentais em uma rodovia com tráfego pesado (KRAEMER, 1997). A implantação da CPA continua sendo utilizada em diversos países como Bélgica, Alemanha, Holanda, Itália, Reino Unido, Espanha, Suíça e Áustria. Na Holanda, o principal motivo para a utilização da CPA é a redução de ruído dos motores dos veículos (KANDHAL, 2002).

No Brasil, a experiência com o uso da camada porosa de atrito se iniciou em 1983, com a implementação do material na pista de pouso do aeroporto de Confins em Belo Horizonte – MG (OLIVEIRA, 2003). Bernucci et al. (2008) citam outros exemplos de utilização da CPA em obras brasileiras:

- Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro: CPA executada em 1999 (Figura 3), e renovada em 2003, nos pontos e maior uso, devido a colmatção dos poros e a consequente perda da capacidade drenante;
- Rodovia dos Imigrantes, ligando São Paulo a Santos: em 1998 foi executada uma restauração através de fresagem seguida de recapeamento, com uma espessura de 5cm entre os quilômetros 11,5 e 30;
- Rodovia Presidente Dutra, próximo a São Paulo: em 1998 foi executada uma camada de 2cm de micro revestimento asfáltico e aplicada uma CPA com 4cm de espessura.

Figura 3 - CPA executado no Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro a) Vista geral e b) Textura superficial



Fonte: Bernucci et al. (2008)

2.2. PROPRIEDADES

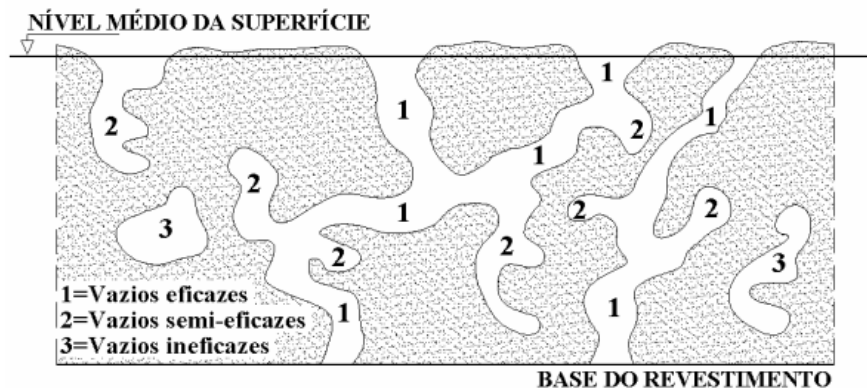
2.2.1. Volume de Vazios

A permeabilidade de uma camada porosa de atrito está diretamente ligada a porcentagem de vazios presente na mistura. Para se ter uma correta análise dessa propriedade, é necessário ter conhecimento sobre a distribuição dos vazios no interior da mistura (Figura 4). Segundo a Associação das Rodovias do Japão (1996), esses vazios podem ser classificados como:

- a) Vazios efetivos: poros que contribuem para a percolação e armazenagem de um determinado fluido;

- b) Vazios semi-eficazes: poros que contribuem apenas para a armazenagem de um determinado fluido, não contribuindo para a sua percolação;
- c) Vazios ineficazes: poros que não contribuem nem para a percolação e nem para o armazenamento de um determinado fluido.

Figura 4 - Aspectos dos tipos de vazios em seção de um revestimento drenante



Fonte: Council (1998)

Um grande problema observado na utilização de asfaltos drenantes é a colmatação dos poros, ou seja, o entupimento desses vazios. Esse fenômeno é ocasionado principalmente pela movimentação de partículas trazidas durante a passagem de veículos ou escoados pela água da chuva, além da deterioração dos materiais da camada (VIRGILIIS, 2009; PINHEIRO, 2004).

Para auxiliar no processo de desentupimento dos poros, GAL (1992) descreve a realização do seguinte procedimento: limpeza com vassouras a seco ou úmida sem pressão, secagem da parte superior da estrutura, avanço dos equipamentos de manutenção ajustados à situação do revestimento local, regulagem e orientação dos jatos d'água e aspiração.

2.2.2. Desgaste Cântabro

A desagregação de pavimentos, causada pela perda de ligação entre agregado e ligante, é um problema que pode ocorrer nos revestimentos. A análise do comportamento da camada porosa de atrito em relação ao desgaste é de grande importância, pois a composição da mistura influencia na perda de adesão e de coesão,

devendo ser investigada a fim de atender as solicitações mínimas do tráfego (LYTTON, 2004; FILHO, 2001; PÉREZ-JIMENÉS et al., 1997).

As zonas de contato entre os agregados contribuem para a estabilidade estrutural do revestimento. A desagregação pode ocorrer por falha adesiva, que é a perda de adesão entre o agregado graúdo e o ligante asfáltico, ou por falha coesiva, quando acontece microtrincas no revestimento.

Lytton (2004) aponta que a adesão pode sofrer influência de fatores como a composição mineralógica do agregado, a umidade, a composição do ligante asfáltico e a presença de materiais finos e sujeira na mistura. A resistência a desagregação será melhor quanto menor a perda de massa no ensaio de Desgaste Cântabro (BERNUCCI et al., 2008).

Estudos realizados por Mallick et al. (2000) mostram a relação entre a resistência à abrasão e o percentual de vazios na mistura. Os autores avaliaram misturas de CPA com teor médio de ligante de 5,5%, concluindo que o aumento do volume de vazios (Vv) é diretamente proporcional ao desgaste na amostra. A Tabela 2 contém estes resultados.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de resistência a abrasão

Mistura (% passante na #4,75mm)	Desgaste Cântabro CP não envelhecido(%)	Desgaste Cântabro CP Envelhecido (%)	Vv médio (%)
15	14,7	29,3	15,1
25	12,1	19,6	14,3
30	11,7	17,2	13,6
40	8,1	15,5	12,5

Fonte: Adaptado de Mallick et al. (2000)

2.2.3. Escorrimento

O escorrimento do ligante asfáltico é um fenômeno que pode ocorrer no CPA, a longo e curto prazo, respectivamente, durante sua produção até a sua utilização. Os vazios presentes em sua estrutura, sua composição predominantemente pétreo e um teor elevado de ligante, são algumas das causas para este acontecimento. A altas temperaturas a viscosidade do ligante diminui, o que o leva a seguir o fluxo da

gravidade e ir para as camadas inferiores do revestimento. Esse fenômeno leva o líquido a preencher alguns vazios, acarretando uma diminuição do volume de vazios e da permeabilidade. (MENEZES, 2017).

O ensaio de escorrimento é realizado para determinar a potencial quantidade de ligante que poderá escorrer na mistura, quando esta for submetida a altas temperaturas. Um valor máximo é estabelecido neste ensaio de maneira a evitar a perda de ligante nos processos de produção, que vão desde o transporte, a aplicação e compactação (BERNUCCI et al., 2008).

2.2.4. Permeabilidade

A permeabilidade é uma das principais propriedades para se avaliar o desempenho da camada porosa de atrito. Ela expressa a capacidade que um determinado fluido possui para passar pelos poros existentes da mistura.

A determinação do coeficiente de permeabilidade (k) pode ser realizada tendo como base a lei experimental desenvolvida pelo engenheiro francês Henry Darcy, proposta em 1856. De acordo com Darcy, a velocidade média de percolação do fluido (v) é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico (i) (CAPUTO, 2000).

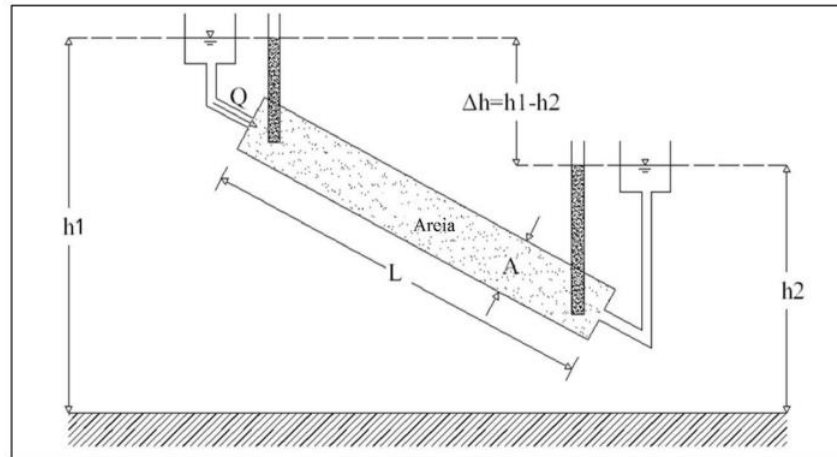
$$v = k \cdot i \quad (1)$$

A velocidade média de percolação é definida como a divisão entre a taxa de escoamento do fluido (Q) e a área da seção transversal da amostra (A) multiplicada pelo intervalo de tempo (t). Já o gradiente hidráulico, é definido como a relação entre a variação de carga (Δh) e a altura da amostra (L). Na Figura 5 é apresentado um esquema do experimento realizado por Darcy (UMILIACO e BENEDETTO, 2013).

$$\frac{Q}{A \cdot t} = k \cdot i \quad (2)$$

$$Q = k \cdot i \cdot A \cdot t \quad (3)$$

Figura 5 - Esquema do experimento realizado por Darcy



Fonte: Umiliaco e Benedetto (2013)

É válido ressaltar que a lei de Darcy apenas é válida para um escoamento laminar, ou seja, quando a trajetória das partículas d'água não se cortam (CAPUTO, 2000; UMILIACO e BENEDETTO, 2013).

Botteon (2017), afirma que a condutividade dos pavimentos permeáveis é influenciada por fatores como o tamanho máximo do agregado, teor de vazios, locais expostos a poeiras, interseções com rodovias sem pavimentação e alto volume de tráfego que mantem a porosidade devido ao efeito de limpeza dos pneus.

Ao longo da vida útil do revestimento, é natural a perda da permeabilidade. A colmatação dos poros, que faz acontecer o fechamento dos vazios presentes, acontece devido a situações como o carregamento de resíduos realizado por veículos, escoamento do ligante, poluição, deformação permanente. Segundo a literatura existente, essa redução da permeabilidade é comum, principalmente nos primeiros anos de utilização do pavimento, sendo o percentual de redução de até 50% (MENEZES, 2019; COLERI et al., 2013; PORTO, 1999; COOLEY, 1999; SWART, 1997).

Conforme norma ASTM D7064 (2013), para que ocorra a boa drenabilidade do Camada Porosa de Atrito e o correto funcionamento do pavimento, o valor mínimo

recomendado do coeficiente de permeabilidade (k) é de 0,1157 cm/s. A seguir, serão expostos alguns resultados obtidos de estudos sobre CPA.

Mampearachchi (2019), avaliou a permeabilidade com três diferentes graduações de agregados de graduação aberta (OGFC), combinadas com ligante asfáltico CAP 60/70. A permeabilidade das amostras preparadas foi realizada utilizando o método de pressão constante sob várias condições de pressão. As porcentagens de agregados finos (passando pela peneira de 4,75 mm) das graduações A, B e C foram 20%, 23% e 15%, respectivamente. Os finos (passando na peneira de 75 microns) das misturas A, B, C são 3,4%, 2,5% e 2,3%, respectivamente. O teor ideal de betume do projeto usado para as três misturas (A, B e C) foi de 5,5%, 5,3% e 5,3%, respectivamente, conforme observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Graduações OGFC usadas para o estudo

Tamanho	Mix A	Mix B	Mix C
19 mm	100	100	100
12,5 mm	95	96	96
9,5 mm	74	70	71
4,75 mm	20	23	15
2,36 mm	8	10	8
1,18 mm	6	5	6
600 μ m	4	4	5
300 μ m	4	3	4
150 μ m	4	3	3
75 μ m	3,4	2,5	2,3
OBC	5,50%	5,30%	5,30%

Fonte: Mampearachchiet (2019)

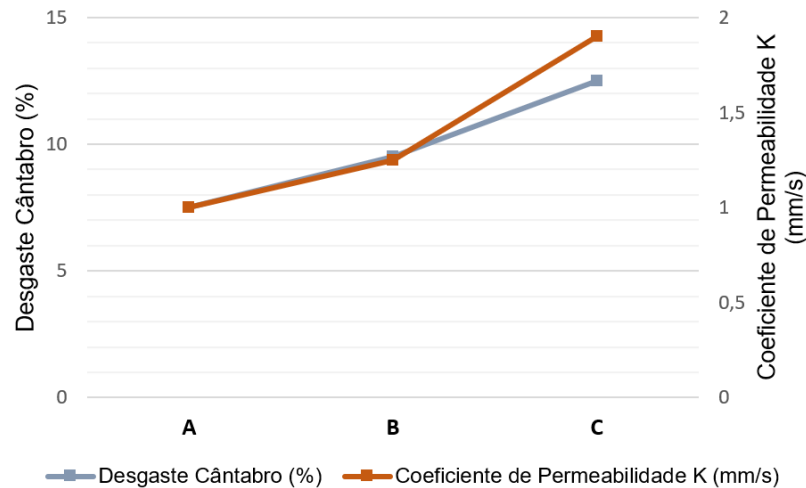
Os resultados prescritos na Tabela 4 e Figura 6 apresentam que a permeabilidade da amostra preparada usando a graduação C teve maior permeabilidade e a menor durabilidade.

Tabela 4 - Valores da permeabilidade para as três graduações

Mistura	k1 (cm/s)	k2 (cm/s)	k3 (cm/s)	k (cm/s)
A	0,1177	0,0870	0,0751	0,0933
B	0,1838	0,0850	0,0971	0,1220
C	0,1924	0,2191	0,1525	0,1880

Fonte: Adaptado de Mampearachchiet (2019)

Figura 6 - Comparação da durabilidade e permeabilidade das graduações A, B e C



Fonte: Mampearachchiet (2019)

Berto et al. (2019), avaliaram os ensaios hidráulicos e mecânicos de concreto poroso asfáltico em comparação ao concreto asfáltico convencional. Os estudos foram realizados para a “Faixa C”, conforme DNER-ES 031 (2006), a “Faixa III”, com Camada Porosa de Atrito - CPA, de acordo com DNER-ES 389 (1998) e os demais seguiram o modelo de revestimento asfáltico permeável, conforme a revisão literária considerando as especificações. Foi utilizado agregado natural e ligante asfáltico CAP 50/70. Dessa forma a “Faixa Ref.1”, em conformidade com os estudos de Azzout et al. (1994) e a “Faixa Ref. 2” adota segundo estudos de Acioli (2005). Utilizou-se o teor de 5,0% para a Faixa C e de 4,6% para as demais granulometrias. A granulometria adotada em cada faixa está exposta na Figura 7.

Figura 7 – Faixas granulométricas utilizadas

Peneiras		1 ½”	1”	¾”	½”	3/8”	N° 4	N° 10	N° 40	N° 80	N° 200
FAIXA C	7.5	0,00%	0,00%	0,00%	12,35%	7,81%	20,09%	17,75%	18,11%	9,98%	7,51%
	7.6	0,00%	0,00%	0,00%	12,35%	20,16%	40,25%	58,00%	76,11%	86,09%	93,60%
	7.7	100,00%	100,00%	100,00%	87,65%	79,84%	59,75%	42,00%	23,89%	13,91%	6,40%
FAIXA III	7.5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	13,32%	39,88%	30,76%	7,71%	0,00%	3,07%
	7.6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	13,32%	53,20%	83,96%	91,67%	91,67%	94,74%
	7.7	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	86,68%	46,80%	16,04%	8,33%	8,33%	5,26%
FAIXA REF.1	7.5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	8,88%	53,04%	25,55%	5,13%	0,00%	3,55%
	7.6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	8,88%	61,92%	87,47%	92,60%	92,60%	96,15%
	7.7	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	91,12%	38,07%	12,52%	7,40%	7,40%	3,85%
FAIXA REF.2	7.5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	22,85%	59,00%	12,26%	0,00%	0,00%
	7.6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	22,85%	81,85%	94,11%	94,11%	94,11%
	7.7	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	7,15%	18,15%	5,89%	5,89%	5,89%

Fonte: Berto et al. (2019)

Os resultados obtidos mostram que para a “Faixa Ref. 2” os valores da permeabilidade foram em média 1,95mm/s, para a “Faixa III” valores próximos a 1,02 mm/s, a “Faixa Ref. 1” a permeabilidade foi em média $1,63 \times 10^{-3}$ mm/s e, por fim, a “Faixa C” que não pode ser considerada permeável pelo seu baixo desempenho hidráulico.

Schneider et al. (2019) em seus estudos buscou determinar, para diferentes teores de ligante asfáltico em uma mistura aberta, que atendem aos critérios estabelecidos em norma para o CPA. Foi utilizado agregado obtido da britagem de rocha basáltica, granulometria que se enquadra na Faixa V do DNER ES 386 (1999) e ligante asfáltico AMP FF/75, modificado por polímero SBS. Os teores de asfalto utilizado variaram entre 3,0 à 6,0%. Os resultados mostram que, para a faixa em estudo, quanto maior o teor de ligante asfáltico, menor será o volume de vazios e, conseqüentemente, menor será a permeabilidade em cm/s. Os maiores valores de permeabilidade encontrados foram para teores betuminosos de 3,5% e 4,5%, ficando o valor de 3,0% fora da linha de tendência.

2.3. ESTUDOS DE CPA COM UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA

Considerando o uso de escória para CPA, são poucos os trabalhos que foram realizados em todo o mundo. Dessa maneira, será apresentado um trabalho que obteve resultados significativos em relação a substituição do agregado natural pela escória.

Pathak (2020) cujo estudo é intitulado como *Evaluation of Benefits of Open-Graded Friction Courses with Basic Oxygen Furnace Steel-Slag Aggregates for Hilly and High-Rainfall Regions in India*, avaliou os benefícios da utilização no CPA da escória de aciaria, provenientes da produção do aço. Seus estudos seguiram a norma ASTM D7064 e todos os requisitos solicitados para a escória, que serão apresentados na Tabela 5. Foram avaliadas misturas asfálticas com porcentagens de substituição de agregado natural por escória de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. A escória utilizada, que foi obtida de uma usina siderúrgica localizada na Índia, apresentou propriedades físicas superiores em relação a abrasão Los Angeles, menor desgaste, melhor

adesividade, o que permite uma melhor adesão entre ligante e agregado. O ligante asfáltico utilizado é o CAP 30/45 e a graduação segue exposta na Figura 8.

Tabela 5 – Propriedades Físicas dos Agregados

Propriedades	Especificações	Agregado Natural	Escória LD
Massa específica	-	2.620	3.268
Absorção de água (%)	Máximo 2 ^a	0.65	1.95
Abrasão do agregado (%)	Máximo 30 ^a	22.6	12.2
Expansão volumétrica (%)	Máximo 1 ^b	NA	0.78
Adesividade ao ligante (%)	Máximo 95 ^c	100	100

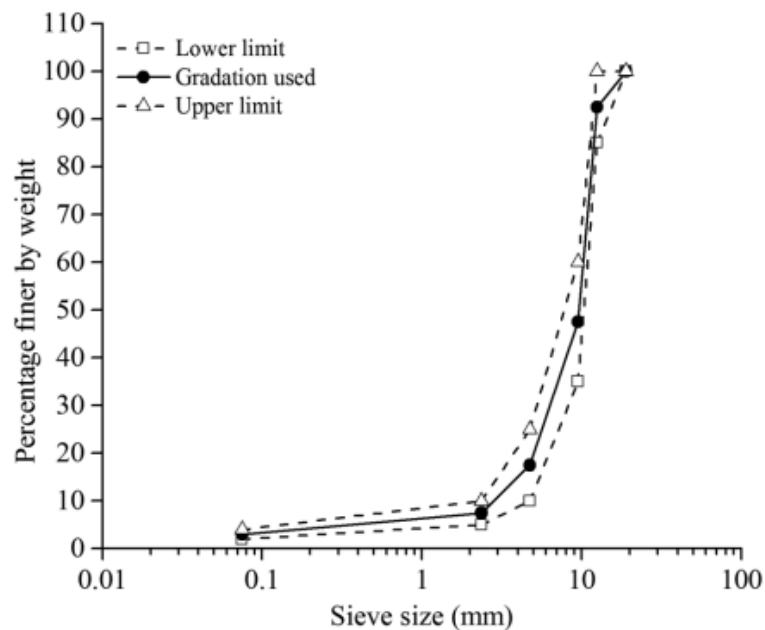
^aEspecificações pela norma ASTM D7064 para agregados usados em CPA

^bEspecificações reportadas na literatura (Chesner et al. 2002; Wu et al. 2007; Kavussi e Qazizadeh 2014).

^cEspecificações do Ministry of Road Transport and Highways Specifications

Fonte: Pathack (2020)

Figura 8 - Graduação utilizada na mistura



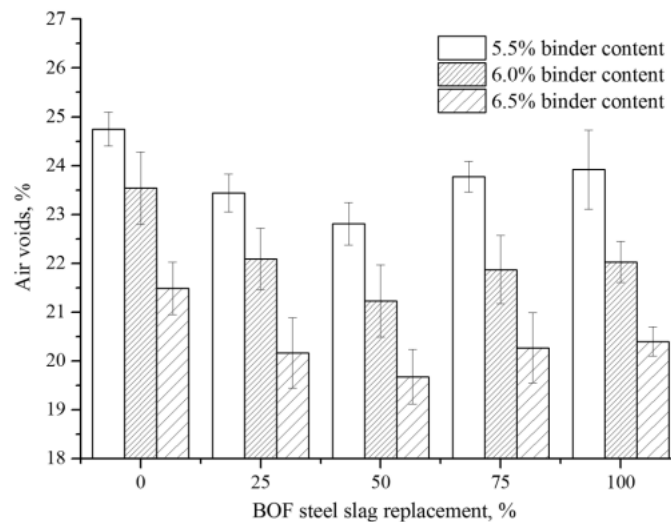
Fonte: Pathack (2020)

Esperava-se que o uso da escória de aciaria obtivesse melhor desempenho na mistura de CPA. Para o estudo, utilizou teores de ligantes de 5,0%, 5,5% e 6,0%,

sendo avaliados em relação aos parâmetros volumétricos, densidade aparente, drenagem e perda por abrasão envelhecida.

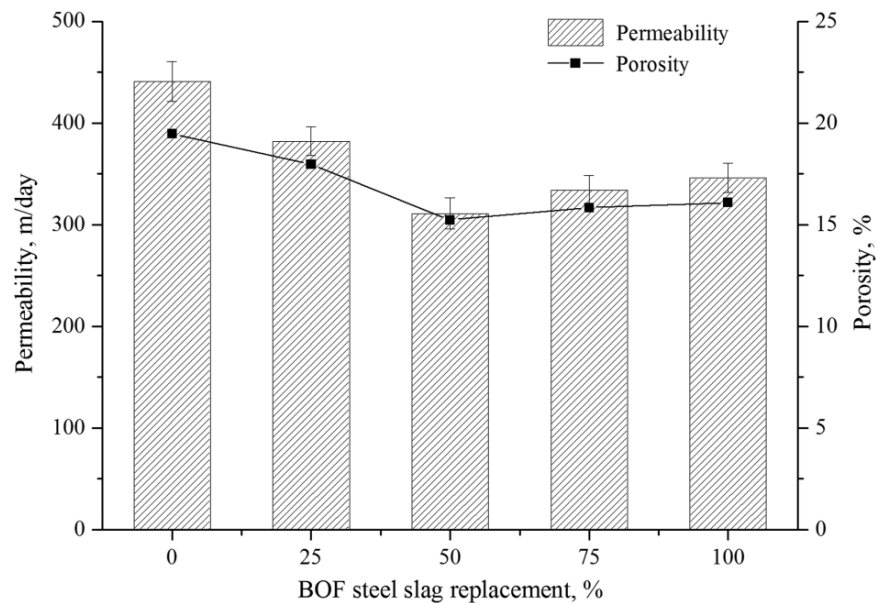
Os resultados obtidos mostram que quanto maior o teor de ligante, maior será a densidade aparente, devido a melhor trabalhabilidade da mistura. Esta densidade também aumenta com o aumento percentual da substituição de agregados de aciaria, isso devido a escória ter maior massa específica se comparada ao agregado natural, o que diminui o volume da mistura quando aumentamos o percentual de substituição. O volume de vazios diminui com o aumento do teor de ligante na mistura (Figura 9), já em relação a substituição de agregados a porcentagem de 50% apresentou melhor volume de vazios. O autor expõe que o aumento do teor de escória aumenta a trabalhabilidade devido a melhora da densidade aparente, reduzindo o volume de vazios, somado a fatores como angularidade que aumenta quando se utiliza mais escória.

Figura 9 - Volume de vazios em relação aos teores de ligante



Fonte: Pathack (2020)

Figura 10 - Resultados de porosidade e permeabilidade



Fonte: Pathack (2020)

Em resumo, como apresentado na Figura 10, os resultados mostram que a substituição do agregado natural por escória de aciaria pode ser benéfica, pois resultaram em misturas com boas condições de permeabilidade e de resistência mecânica. A substituição do agregado natural por escória resultou em valores médios de permeabilidade de 300m/dia a 430 m/dia, que embora sejam menores do que os valores encontrados em misturas com agregado natural em estudo, ainda assim foram acima do mínimo estabelecido por norma, i.e., 100m/dia. Os resultados de danos por umidade induzida (DUI) foram melhores nas misturas com a escória, sendo essa alta resistência ao DUI explicada pela alta basicidade do agregado em relação ao agregado natural, sendo esperado uma maior aderência entre ligante e agregado.

Outro resultado significativo é referente a resistência à derrapagem, que apresentaram melhoria para os aspectos de segurança viária. A resistência a abrasão foi menor nas misturas com substituição do material, houve uma menor perda por abrasão, com todos os resultados ficando abaixo do limite máximo estabelecido por norma. A única exceção foi a mistura com substituição de 100% de agregado, apresentando perda por abrasão superior ao determinado por norma.

2.4. PROCESSO SIDERÚRGICO

A indústria siderúrgica é frequentemente considerada como um indicador de progresso econômico. Em 2020, a indústria de aço brasileira produziu 31,4 milhões de toneladas de aço bruto, levando o país a ocupar a 9ª posição no ranking da produção mundial, conforme Tabela 6 (IAB, 2020).

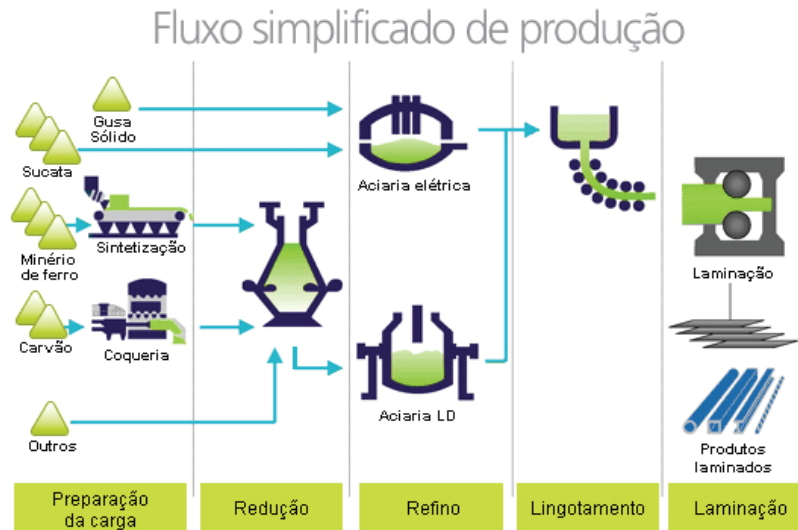
Tabela 6 - Ranking de produção mundial de aço em 2020

Ranking	País	Produção (%)
1º	China	56,7
2º	Índia	5,3
3º	Japão	4,4
4º	EUA	3,9
5º	Rússia	3,8
6º	Coreia do Sul	3,6
7º	Turquia	1,9
8º	Alemanha	1,9
9º	Brasil	1,7
10º	Irã	1,5

Fonte: Adaptado IAB (2020)

O aço é uma liga metálica formada principalmente de ferro e carbono. Devido a suas propriedades e ao seu baixo custo, passou a representar cerca de 90% de todos os metais consumidos pela civilização industrial (IAB, 2011). O seu processo de fabricação pode ser dividido em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação (FELICIO, 2012). O fluxo simplificado de produção é apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxo simplificado de produção do aço



Fonte: Felício (2012)

Antes de serem levados ao alto forno, ocorre a preparação das principais matérias-primas utilizadas nesse processo. Nas coqueiras, o carvão é destilado em baterias de fornos que são selados e aquecidos a altas temperaturas por períodos de 14 a 36 horas, produzindo o coque metalúrgico. O minério de ferro fino, junto a outros materiais também finos, passa pelo processo de sinterização, originando o sínter, aglomerado que constitui em média, de 70 a 80% da carga do alto forno (FELICIO, 2012; SOUZA, 2007).

No processo de redução, são empregados os altos fornos para a fabricação de ferro gusa. O alto forno é abastecido com minério de ferro, sínter, coque metalúrgico, pelotas, fundentes e outros fluxantes. É insuflado um ar quente no interior do forno gerando uma série de reações químicas de redução e fusão, transformando os óxidos de ferro em ferro gusa e gerando a escória de alto-forno (OLIVEIRA, 2011; SOUZA, 2007; PACHECO, 2017; BALTAZAR, 2001).

A etapa seguinte do processo é o refino. O ferro gusa, ainda em estado líquido, é enviado a aciaria, e através da queima de impurezas e adições, é transformado em aço. Há dois tipos diferentes de fornos onde ocorre o refino do ferro gusa: o conversor LD (*Linz Donawitz*), também conhecido como BOF (*Basic Oxygen Furnace*), que utiliza o conversor a oxigênio, e o elétrico ou EAF (*Electric Arc Furnace*), que utiliza o forno de arco elétrico. Ambos os processos apresentam remoções de impurezas do

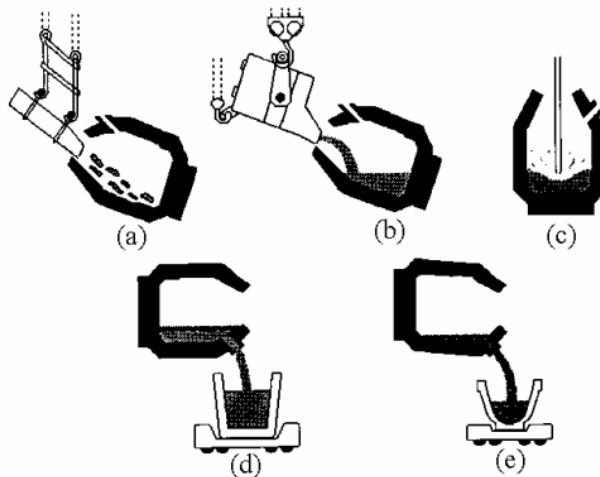
ferro para a produção do aço, essas impurezas são eliminadas em forma de escórias de aciaria. (MACHADO, 2000; PACHECO, 2017; BALTAZAR, 2001; RAPOSO, 2005).

A última fase do processo de produção do aço é a laminação. Através do lingotamento, o metal líquido é solidificado e passa para a laminação, onde é submetido a deformações plásticas, originando os produtos laminados que serão utilizados pela indústria como chapas grossas e finas, barras, vergalhões, hastes, etc. (BALTAZAR, 2001).

2.4.1. Formação da Escória de Aciaria LD

Neste trabalho, foi utilizada a escória de aciaria produzida a partir do refino do ferro gusa nos conversores LD. Nessa etapa, os conversores a oxigênio transformam o ferro gusa misturado com sucatas metálicas sólidas em aço. A sequência de operação do conversor é apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Sequência de operação do conversos a oxigênio tipo LD ou BOF (a) Carregamento da sucata; (b) Carregamento do ferro gusa líquido; (c) Sopros de oxigênio; (d) Vazamento do aço; (e) Vazamento da escória de aciaria no pote de escória



Fonte: Araujo (1997); Machado (2000)

Inicialmente, os conversores são abastecidos de sucata, por meio de calhas ou vagões-basculantes, e de ferro gusa líquido, em temperaturas de 1300 a 1450°C. Em seguida, é insuflado, através da lança refratária, oxigênio gasoso a altas pressões, ocorrendo a oxidação do carbono, do silício, do manganês, do fósforo e do ferro presentes no ferro gusa. Após a fusão do metal, os óxidos formados reagem com a

cal virgem (CaO) e com a dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), que são inseridas no conversor por meio de um silo montado sobre o equipamento, formando a escória de aciaria (RAPOSO, 2005; CAMINHOS, 2018).

Antes de finalizar o processo de refino, o aço líquido é separado da escória LD, devido às diferenças de densidade entre os dois materiais. A escória, ao ser vazada do conversor para um recipiente mais conhecido como “pote de escória”, é transportada para um local adequado onde é basculada e, posteriormente, resfriada por borrfio de água ou ao ar livre (ATHAYDE JUNIOR, 2005).

A fim de dar um destino nobre aos coprodutos de aciaria gerados, muitas empresas siderúrgicas realizam um beneficiamento do material. Destaca-se os procedimentos de britagem, peneiramento e separação magnética são indispensáveis pra se obter um agregado de escória de qualidade (CAMINHOS, 2018). Além disso, devido à instabilidade volumétrica das escórias de aciaria, realiza-se também para fins de uso em obras de infraestrutura rodoviária, o processo de cura da escória consiste em molhá-la por um determinado período, permitindo a hidratação dos referidos óxidos livres com o objetivo de acelerar a expansão volumétrica (MACHADO, 2000).

2.5. ESCÓRIA DE ACIARIA

As características das escórias de aciaria variam em função do processo de geração da escória, do tipo de aço fabricado, da matéria-prima utilizada, da forma de resfriamento e de sua armazenagem após o resfriamento, e até mesmo do revestimento do alto forno. (BALTAZAR, 2001; BATTAGIN, 2002; RAPOSO, 2005).

De forma geral, as escórias de aciaria LD são compostas principalmente por óxido de ferro, silício, cálcio e magnésio (BEZERRA, 2007; CHOTOLI, 2006). Moura et al. (2020), em seu trabalho, submeteu as amostras de escória LD ao ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX). Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 7.

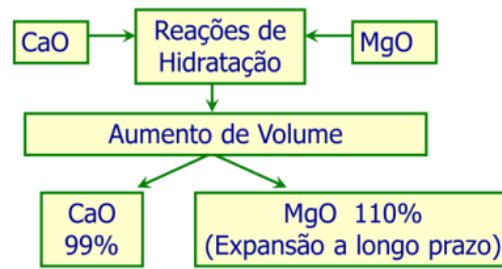
Tabela 7 - Resultados de FRX da escória LD

Óxido	Média (%)
Al ₂ O ₃	6,02
CaO	40,78
Cr ₂ O ₃	0,19
Fe ₂ O ₃	21,75
K ₂ O	-
MgO	7,495
MnO	2,725
Na ₂ O	0,17
P ₂ O ₅	1,03
SiO ₂	10,35
TiO ₂	0,345
ZrO ₂	-
SO ₃	0,2
ZnO	-

Fonte: Adaptado de Moura et al. (2020)

Uma das limitações na utilização das escórias de aciaria é a sua expansão, que ocorre principalmente devido a presença de cal (CaO) e magnésio (MgO) livres em sua composição (Figura 13). O CaO livre na presença de umidade, sofre o processo de hidratação transformando-se em hidróxido de cálcio, causando mudanças no volume a curto prazo. Já o MgO na forma livre e na presença de umidade, sofre esse processo de forma mais lenta, formando o hidróxido de magnésio ou brucita (Mg(OH)₂), podendo levar até anos para se desenvolver. A variação de volume provoca a desintegração dos agregados da escória e a perda de resistência (ROHDE, 2002; PACHECO, 2017; BEZERRA, 2007; BALTAZAR, 2001; VILELA, 2006; RAPOSO, 2005).

Figura 13 - Fluxograma sobre a expansão do CaO e MgO



Fonte: Vilela (2006)

Em relação a composição mineralógica, as escórias de aciaria são compostas por silicato dicálcico (β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), silicato tricálcico ($3\cdot\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), silicato de magnésio (β - $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$), ferrita dicálcica ($2\cdot\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), Mervinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), Wüstita (FeO), perclásio (MgO), óxido de cálcio (CaO), entre outros compostos (MACHADO, 2000).

Quando comparadas aos agregados naturais, as partículas de escória apresentam maior massa específica, além de maior absorção e textura superficial mais porosa. Estas últimas características podem ser desfavoráveis ao uso da escória LD, pois está associada diretamente ao aumento no consumo de cimento asfáltico (PROCTOR et al., 2002). A escória LD possui melhor resistência ao desgaste a abrasão quando comparada ao agregado natural, o que lhe confere boa aplicabilidade nos revestimentos asfálticos. A Tabela 8 expõe os resultados de caracterização da LD obtidos por Teixeira et al. (2019), Izoton et al. (2021) e Martins (2022). Os valores de propriedades físicas das escórias de aciaria estabelecidos pela norma DNER-EM 262 (1994) estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 8 - Valores de Massa específica, absorção e resistência a abrasão de estudos anteriores

	Teixeira et al. (2019)	Izoton et al. (2021)	Schumacher (2018)	Martins (2022)
Massa Específica	3,05	3,12	3,14	3,45
Absorção (g/cm ³)	3,04	3,40	3,04	4,21
Resistência à Abrasão (%)	19	18	17,1	18,72

Fonte: Autoras

Tabela 9 - Faixa de valores desejáveis de propriedades físicas das escórias de aciaria

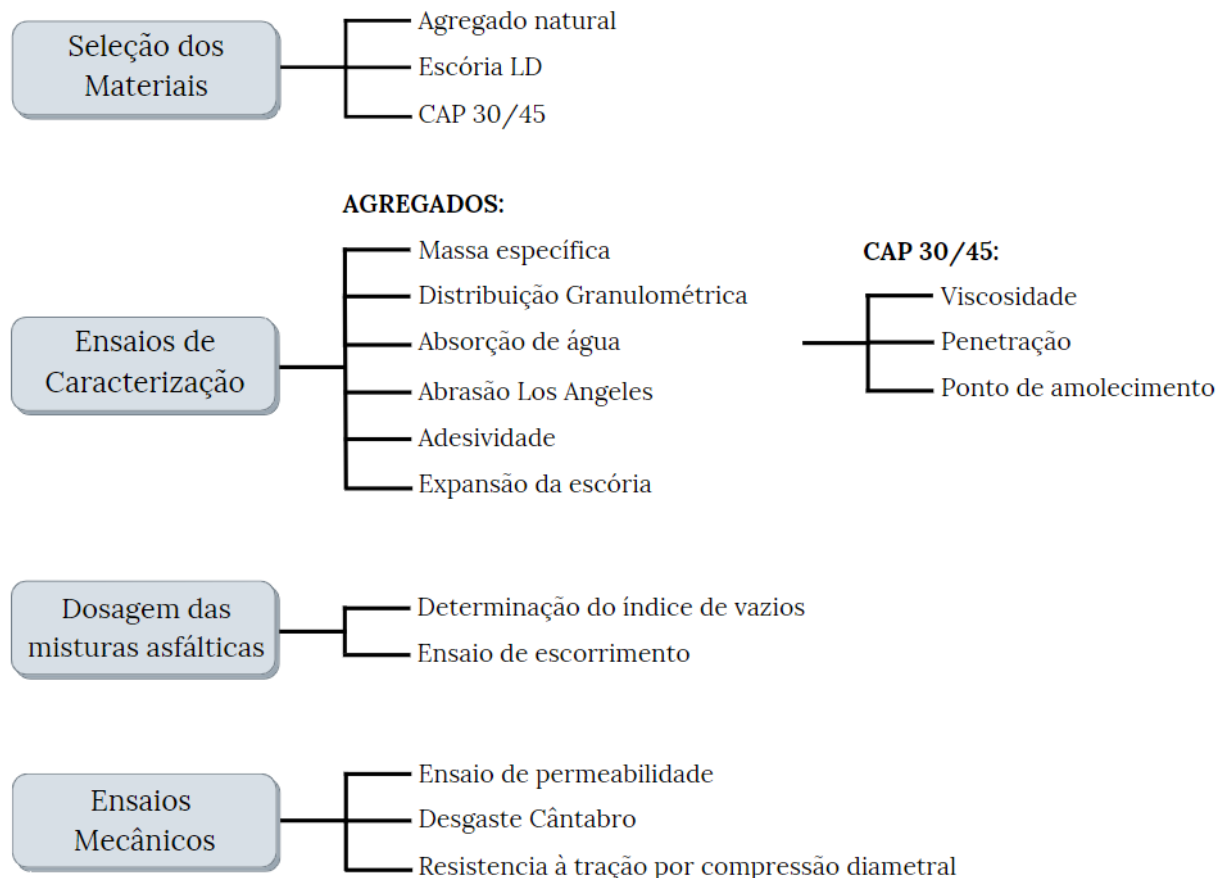
Propriedade	Valor
Massa específica (g/cm ³)	3,0 – 3,5
Massa unitária (kg/dm ³)	1,6 – 1,7
Absorção de água (% em peso)	1% a 2%

Fonte: DNER (1994)

3. METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos deste trabalho foram definidas algumas etapas constituídas de ensaios experimentais realizados nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da UFES. O fluxograma da Figura 14 representa um resumo dos materiais e métodos e a ordem cronológica da realização da campanha experimental.

Figura 14 - Planejamento Experimental



Fonte: Autoras

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O ligante betuminoso utilizado nessa pesquisa foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) classificado como CAP 30/45 (Figura 15), fornecido pela empresa Vilabetume situada na Marca Ambiental, município de Cariacica - ES. Sua ficha de especificação foi realizada e enviada pelo laboratório da REDUC, e está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Especificações do CAP 30/45 utilizado na pesquisa

CERTIFICADO DE ENSAIO (Cimento Asfáltico 30/45)				
Características	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	30 a 45	35	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	52 min	52,0	grau C
Viscosidade Brookfield 135 GC-SP21 20	D 4402	374 min	508	cP
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21	D 4402	203 min	246	cP
Viscosidade Brookfield 177 GC-SP21	D 4402	76 a 285 min	88	cP
RTFOT Penetração Retida	D 5	60 min	66	%
RTFOT – Aumento do Ponto de	D 36	8 máx	4	grau C
RTFOT – Ductilidade a 25GC	D 113	10 min	>150	cm
RTFOT – Variação em % Massa	D 2872	-0,5 a 0,5	0,1	%
Ductilidade a 25GC	D 133	60 min	>150	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042	99,5 min	100,0	% massa
Ponto de Fulgor	D 92	235 min	>360	grau C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	-1,5 a 0,7	-1,5	N/A
Densidade Relativa a 20/4 Graus Celsius	D 70	-	1,054	N/A
Aquecimento a 177 GC	X 215	NESP	NESP	N/A
Local: TQ 230258	Data/hora amostragem: 17/05/2020 13:00			

Notas:

Viscosidade Brookfield a 60°C (D-4402) – (SP29, 5 RPM) > 200000 Cp; NESP = Não Espuma

Fonte: Laboratório REDUC

Figura 15 - CAP 30/45 utilizado



Fonte: Autoras

3.1.2. Agregados

Para a produção das misturas asfálticas estudadas foram utilizados dois tipos de agregados, um agregado siderúrgico e um natural. O agregado siderúrgico empregado foi a escória LD (Figura 16), fornecida pela siderúrgica ArcelorMittal Tubarão, localizada na Serra (ES). Antes de chegar ao laboratório, para que fosse possível dar início a essa pesquisa, o material passou por um processo de cura no pátio da empresa. O agregado natural (AN) utilizado, exposto na Figura 17, possui origem granítica, e foi usado nas formas de brita 1 (B1), de brita 0 (B0) e de pó-de-pedra, fornecidos pela empresa Brasitália, localizada em Cariacica (ES).

Figura 16 - Amostra de escória LD utilizada



Fonte: Autoras

Figura 17 - Amostra de agregado natural utilizada



Fonte: Autoras

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Caracterização dos Materiais

3.2.1.1. Parâmetros Gerais

Para a aplicação dos materiais utilizados nos pavimentos é necessário verificar as propriedades físicas e mecânicas que são desejáveis nos concretos asfálticos

porosos (CPA), normalizados pelo DNER-ES 386 (1999), Pavimentação - pré-misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito, pelo DNIT 031 (2006), Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço e, no caso dos materiais utilizados nesta análise, também pelo DNER-EM 262 (1994), Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários.

A caracterização dos agregados foi realizada através dos ensaios de granulometria, massa específica, adesividade, perda por abrasão *Los Angeles*, absorção e expansão da escória utilizada. O ligante foi caracterizado conforme os ensaios de penetração, viscosidade, ponto de amolecimento e ductilidade. A seguir, serão descritas as metodologias empregadas.

3.2.1.2. Caracterização do Ligante Asfáltico

Com o intuito de confirmar alguns valores obtidos na ficha de especificação do fabricante e determinar as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas, amostras de CAP foram caracterizadas conforme os ensaios de penetração (ABNT NBR 6576), viscosidade Saybolt-Furol (ABNT NBR 14950) e ponto de amolecimento (ABNT NBR 6560).

a) Viscosidade

A consistência do cimento asfáltico é medida pela viscosidade, na análise da resistência que o material betuminoso possui em relação ao seu escoamento. Para este procedimento foi utilizada a NBR 14950 (Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade Saybolt Furol).

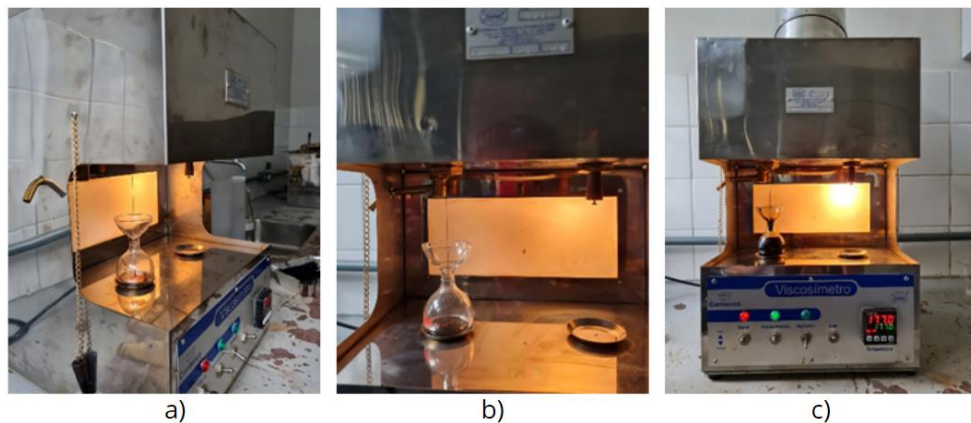
O Sayboly-Furol é o método mais utilizado no Brasil, consistindo em um aparelho que possui um tubo onde é inserido o material que será determinado a viscosidade, mantendo o orifício fechado e o material em banho no óleo até ser atingida a temperatura selecionada do ensaio (Figura 18a). As temperaturas utilizadas nesta pesquisa foram 135°C, 149°C e 177°C.

Quando ocorre a estabilização da temperatura, o orifício que está vedado com uma rolha de cortiça em uma das extremidades do tubo é aberto (Figura 18b). A contagem no cronometro do tempo é iniciada até que o líquido em estudo alcance a

marca de 60 ml (Figura 18c). Os resultados do ensaio são expressos em segundos Saybolt-Furol (SSF), para cada temperatura.

Os resultados obtidos permitem que sejam determinados a viscosidade do ligante em diferentes temperaturas e, consecutivamente, o traçado da curva de viscosidade, que permite obter a temperatura de usinagem e a de compactação que o ligante deve estar no momento da produção das misturas e CPs.

Figura 18 - Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol (a) Equipamento Saybolt-Furol; (b) Orifício após a sua abertura e início da contagem do tempo; (c) Momento precedente ao do líquido atingir a marca de 60 ml



Fonte: Autoras

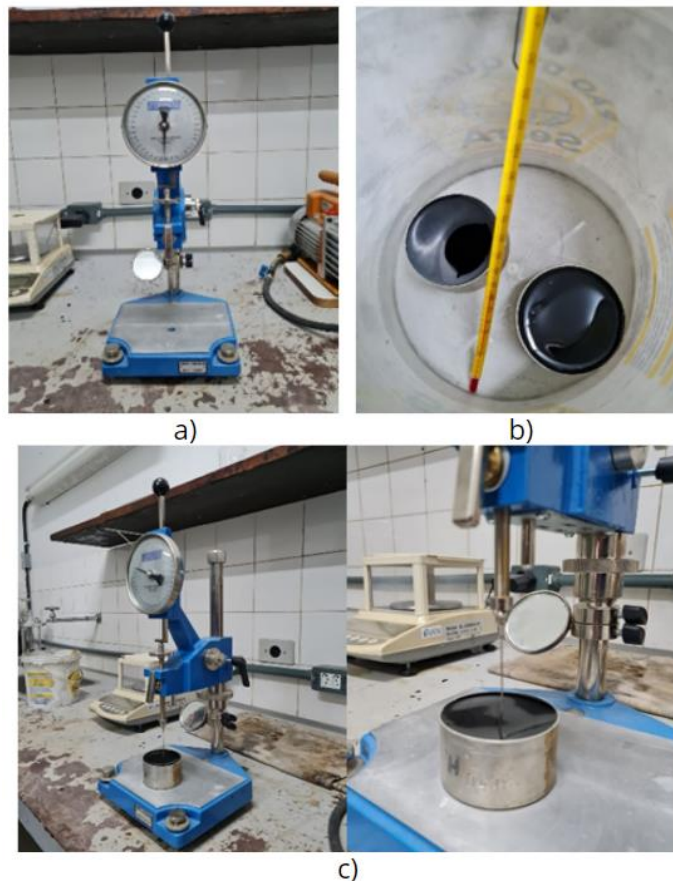
b) Penetração

O ensaio de penetração tem como objetivo determinar o tempo que uma agulha penetra verticalmente uma amostra. Conforme ABNT NBR 6576 (1998), a amostra do ligante asfáltico é aquecida e inserida para o recipiente de penetração, mantendo uma altura, de no mínimo, 120% da profundidade da penetração esperada após o resfriamento. Deixa-se esfriar o material durante 45 a 90 minutos a temperatura ambiente entre 15°C e 30°C e, em seguida, a amostra é submetida a banho d'água (Figura 19b).

O penetrômetro (Figura 19a) é o aparelho utilizado, onde nele é verificado a agulha e a haste. Um peso de 50g é inserido acima da agulha, somando o conjunto um total de 100g. A agulha é ajustada e posicionada na superfície da amostra, até que fique refletida a imagem da agulha na amostra (Figura 19c). A leitura inicial no mostrador (Li) é anotada e, em seguida, a agulha é liberada durante o tempo

especificado em norma e a distância penetrada é verificada (L_f). São realizadas três determinações, distantes da borda do recipiente e entre si em 10 mm no mínimo. O resultado da penetração é obtido com a média entre os valores da penetração das três leituras.

Figura 19 - Ensaio de Penetração (a) Penetrômetro; (b) Amostra submetida a banho d'água; (c) Amostra com a agulha ajustada na sua superfície



Fonte: Autoras

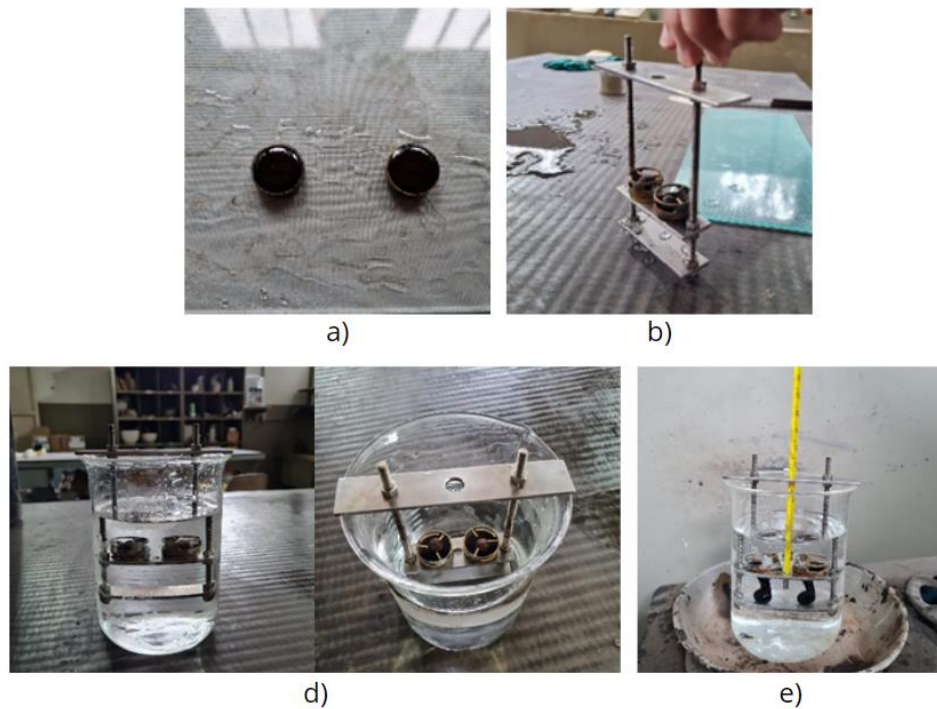
c) Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento determina a temperatura que ligante asfáltico amolece quando aquecido. Conforme a ABNT NBR 6560 (2016), uma amostra de asfalto é aquecida e colocada dentro de um anel metálico. O conjunto é resfriado a temperatura ambiente durante 30 minutos e o excesso é removido do topo dos anéis.

A amostra é encaixada no equipamento anel e bola e colocada em banho junto com duas bolas de aço de dimensões conhecidas (Figura 20), a uma temperatura de $(5 \pm 1^\circ\text{C})$ durante 15 minutos. As esferas são colocadas sobre a superfície das

amostras e o conjunto é aquecido a uma taxa de $(5,0 \pm 0,5)$ °C/minuto em uma fonte de aquecimento. É registrado a temperatura indicada pelo termômetro no momento que as esferas tocarem a placa referência do equipamento (Figura 20e). O resultado do ensaio é a média entre as temperaturas das duas esferas.

Figura 20 - Ensaio de Determinação do Ponto de Amolecimento a) Amostras; b) Equipamento anel e bola com amostra encaixada; d) Equipamento anel e bola em banho; e) Momento que as esferas tocam a placa referência



Fonte: Autoras

3.2.1.3. Caracterização dos Agregados

a) Análise Granulométrica

Para a determinação do percentual em peso que cada faixa granulométrica possui em relação a massa total da amostra, utilizou-se a ABNT NBR 248 (2001), cujo objetivo é obter a curva granulométrica do agregado.

O procedimento consiste em secar o material em estufa e passá-lo em um conjunto de peneiras, das séries normal e intermediária, organizadas em ordem crescente da base ao topo. A massa mínima utilizada é determinada de acordo com

a dimensão máxima nominal do agregado, que segue informada em tabela na norma citada.

Os agregados retidos na peneira de 4,75mm são classificados como grãos, os que passam na peneira de 4,75mm e ficam retidos na peneira de 0,15mm são classificados como miúdos. O material de enchimento é aquele que passa na peneira de 0,15mm e fica retido na peneira de 0,075mm e aquele que passa completamente na peneira de 0,075mm é denominado de filler. Conforme a norma, foram utilizadas as peneiras de 19mm, 12,5mm, 9,5mm, 4,75 mm, 2,36mm, 0,425mm, 0,18mm, 75 μ m e fundo.

Com as massas retidas, para cada peneira é calculado a porcentagem retida e a retida acumulada, com aproximação de 0,1%. Com esses resultados é possível determinar a curva granulométrica do material em estudo, bem como o módulo de finura e a sua dimensão máxima característica.

b) Massa Específica

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, onde exclui-se os poros permeáveis. Para os agregados miúdos e o material de enchimento, cujos grãos estão entre as peneiras de 4,75mm e 0,075mm, sua densidade real é determinada pela norma DNER-ME 084 (1995).

São realizadas três determinações, onde se utiliza o picnômetro e uma bomba a vácuo. O picnômetro vazio é pesado (a) e, cuidadosamente, a amostra é colocada dentro e o conjunto tem sua massa determinada (b). A água destilada é adicionada até cobrir a amostra de agregado contida e o ar é expulso com a utilização da bomba a vácuo. A amostra é resfriada em banho d'água à 25°C e o volume restante do picnômetro é preenchido por água destilada. O picnômetro é seco externamente e tem sua massa com a amostra dentro medida (c). Todo o material é retirado do picnômetro e este é preenchido com água destilada e pesado (d). A Equação 4 demonstra como é determinada a massa específica do agregado miúdo (D).

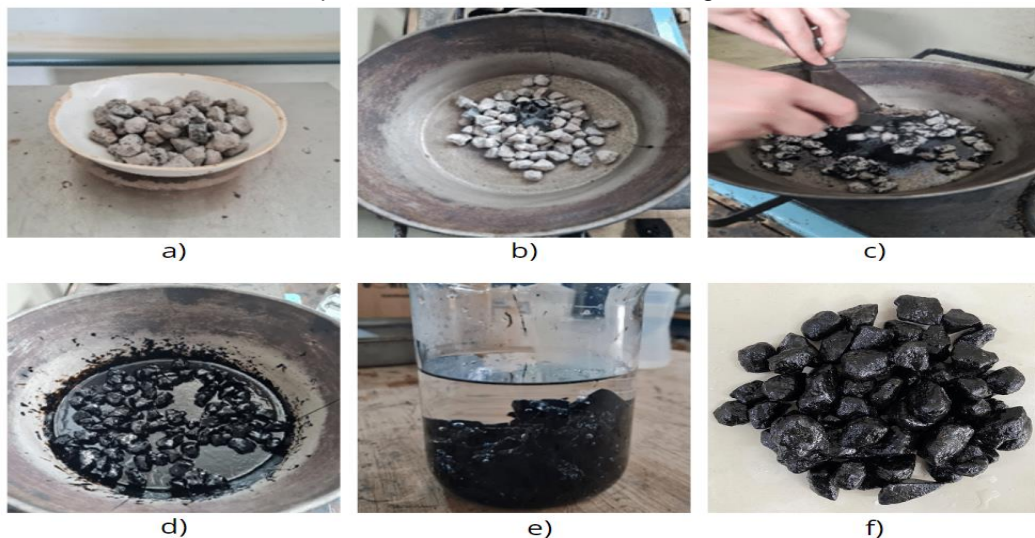
$$D = \frac{(b - a)}{(d - a) - (c - b)} \quad (4)$$

c) Adesividade

A adesividade é a propriedade que o agregado possui de aderir ao ligante asfáltico, sendo a avaliação qualitativa, verificando se a película betuminosa que envolve os agregados desloca ou não. A avaliação é realizada conforme a norma ABNT NBR 12383 (2017).

O método consiste em utilizar (500 ± 1) g dos agregados que passam na peneira de 19mm e fica retido na peneira de 12,5mm. Essa amostra é lavada, colocada em um frasco com água destilada por 1 minuto e em seguida levada a estufa por 2 horas. O ligante asfáltico é levado a estufa a 120°C e, em seguida, adiciona $(17,5 \pm 0,5)$ g deste material aquecido na amostra ensaiada, com auxílio da espátula, até que ele envolva completamente os grãos. A mistura é inserida em um béquer e é coberta por água destilada durante 72 horas. Ao fim do tempo necessário, o material é colocado sobre uma superfície lisa para a análise da adesividade, conforme Figura 21.

Figura 21 - Realização do ensaio de adesividade (a) Amostra seca; (b) Adição do ligante ao agregado e mistura; (c) Mistura entre ligante e agregados; (d) Mistura submersa em água destilada; (e) Mistura após as 72 horas submersa em água



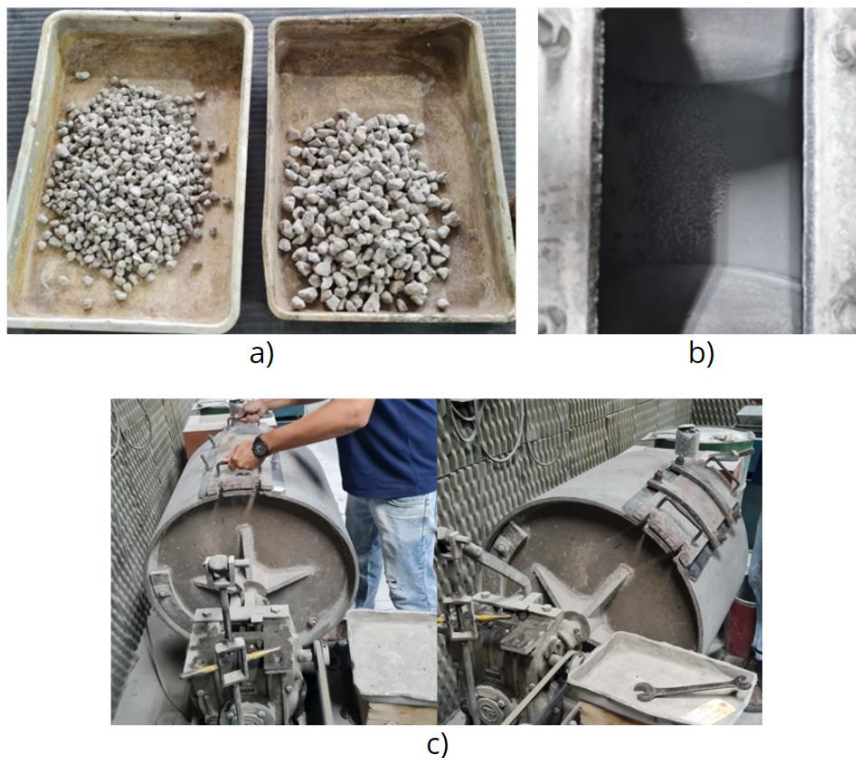
Fonte: Autoras

d) Perda por Abrasão Los Angeles

A perda por abrasão Los Angeles é utilizada para avaliar o desgaste que um agregado apresenta ao ser submetido a uma carga abrasiva. Utiliza-se uma máquina de abrasão Los Angeles, conforme recomendado na ABNT NBR 16971 (2021). A graduação utilizada foi a B, que corresponde a abertura das peneiras de 19,0 – 12,5mm, sendo m a massa inicial da amostra. O material é introduzido no tambor junto a uma carga abrasiva de 11 esferas, e é submetido a uma velocidade entre 30 r/min e 33 r/min, durante 500 rotações. A Figura 22 ilustra os procedimentos deste ensaio. A amostra é retirada do tambor, peneirada em uma malha de abertura de 1,7mm e a massa retida é lavada e colocada em estufa durante 24 horas. Após a secagem a amostra foi pesada (m'). O valor da abrasão Los Angeles (A) é obtido conforme a Equação 5 a seguir.

$$A = \frac{(m - m')}{m} \cdot 100 \quad (5)$$

Figura 22 - Procedimentos do Ensaio de Abrasão Los Angeles (a) Material peneirado e retido nas peneiras de 12,5mm e 9,5mm; (b) Agregados inseridos na Máquina Los Angeles; (c) Máquina Los Angeles



Fonte: Autoras

e) Absorção de água, massa específica e massa aparente

Segundo a ABNT NBR 6458 (2016), o material deve ser lavado na peneira de 4,8mm e ser imerso em água destilada durante 24 horas. Após este prazo, a amostra é retirada da água e enxugada, sendo removida apenas a água superficial, obtendo um material saturado. A massa da amostra saturada e superfície seca (M_{sat}) é determinada conforme tabela em norma, que nos informa que a massa é de 1,5 kg, devido ao diâmetro ser inferior a 25mm.

A amostra é totalmente imersa em água destilada em um cesto de tela e sua massa (M_i) é pesada. A amostra é seca em estufa (M_s) e calcula-se a massa específica dos grãos (ρ_s), conforme a Equação 6, a massa específica aparente dos grãos ($\rho_{ap(s)}$), conforme a Equação 7 e a absorção de água (A_a), conforme a Equação 8.

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_s - M_i} \cdot \rho_w \quad (6)$$

$$\rho_{ap(s)} = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \cdot \rho_w \quad (7)$$

$$A_a = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (8)$$

f) Ensaio de Expansão da Escória

A avaliação do potencial de expansão da escória LD foi realizada através do ensaio preconizado pela norma DNIT 113 (2009). O ensaio se inicia com a preparação da amostra, que deve ser secada ao ar e passada na peneira 19mm, sendo desprezado o material que fica retido. São moldados três corpos de prova, compactados em três camadas com 56 golpes cada no molde CBR, um no ramo seco, outro na umidade ótima determinada através da norma DNER – ME 049 (1994), e o terceiro no ramo úmido. É colocada amostra submersa em um recipiente com água. É colocada também uma haste ajustável e uma placa perfurada na amostra, e aplicada uma sobrecarga de aproximadamente 4,5 kg. Em seguida, os CPs são colocados

submersos em um banho térmico na estufa com temperatura controlada de 71 ± 3 °C, e o extensômetro é ajustado para na leitura zero (Figura 23). Após 30 minutos que a amostra foi colocada na estufa, deve ser feita a primeira leitura com o extensômetro. As próximas medidas são feitas uma vez ao dia, por um período de sete dias. Após esse período, a água é removida desse recipiente, mantendo os CPs dentro da estufa por mais sete dias. As leituras diárias continuam por esse período. A porcentagem de expansão volumétrica deve ser calculada através da Equação 9, onde L_f é a leitura do extensômetro após 14 dias de expansão, e L_i é a leitura inicial.

$$\%Exp = \frac{(L_f - L_i)}{116,4} \times 100 \quad (9)$$

Figura 23 - Amostra em banho térmico com o extensômetro ajustado



Fonte: Autoras

3.2.2. Caracterização das Misturas Asfálticas

3.2.2.1. Dosagem Superpave

Foi feito o estudo de dosagem das misturas propostas, segundo a metodologia Superpave, utilizando o compactador giratório Superpave (CGS) para a moldagem dos corpos de prova (CP). Conforme recomendado pela norma ASTM D7064, a compactação foi realizada com 50 giros.

Para a dosagem, foi adotada uma composição granulométrica enquadrada na Faixa IV, especificada pela norma DNER – ES 386 (1999), apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Faixa granulométrica conforme DNER-ES 386 (1999) e faixa adotada

Peneira de malha Quadrada		Porcentagem passando, em peso		
ABNT	Abertura (mm)	Faixa IV		Faixa adotada
		DNER – ES 386/99 Min	Max	
3/4"	19,0	-	-	-
1/2"	12,5	100		100
3/8"	9,5	70	90	85
Nº 4	4,8	15	30	22
Nº 10	2,0	10	22	11
Nº 40	0,42	6	13	6
Nº 80	0,18	-	-	-
Nº 200	0,075	3	6	3

Fonte: Adaptado DNER (1999)

Mallick et al. (2000), em seus estudos com CPA, analisou a permeabilidade de misturas variando apenas a porcentagem de passante na peneira de abertura 4,75 mm. Em um teste preliminar, os autores colocaram CPs de concreto poroso embaixo de uma torneira e observaram que em misturas com 15% passando pela peneira 4,75 mm, o fluxo de água era livre, fluxo moderado em misturas com 25% passando pela peneira 4,75 mm, e pouco ou nenhum fluxo em misturas com 30% e 40% passando pela peneira 4,75 mm. Os resultados de permeabilidade dos autores corroboraram com a análise preliminar feita. As amostras de 15%, 25%, 30% e 40% apresentaram, respectivamente, valor de coeficiente de permeabilidade equivalente a 117 m/dia, 88

m/dia, 28 m/dia e 21 m/dia. Sendo assim, é possível notar que quanto maior o percentual passante na 4,75 mm, menor a permeabilidade da mistura.

A partir dos resultados obtidos por Mallick et al. (2000), apenas para a realização do ensaio de permeabilidade, foi também adotada uma segunda composição granulométrica, chamada Faixa Teste. Essa nova composição, apesar de não atender a norma DNER-ES 386 (1999) com relação a quantidade de material passante em algumas peneiras, aumentou a quantidade de agregados graúdos na mistura e, principalmente, diminuiu a porcentagem de passante na peneira 4,8 mm, conforme apresentado na Tabela 12.

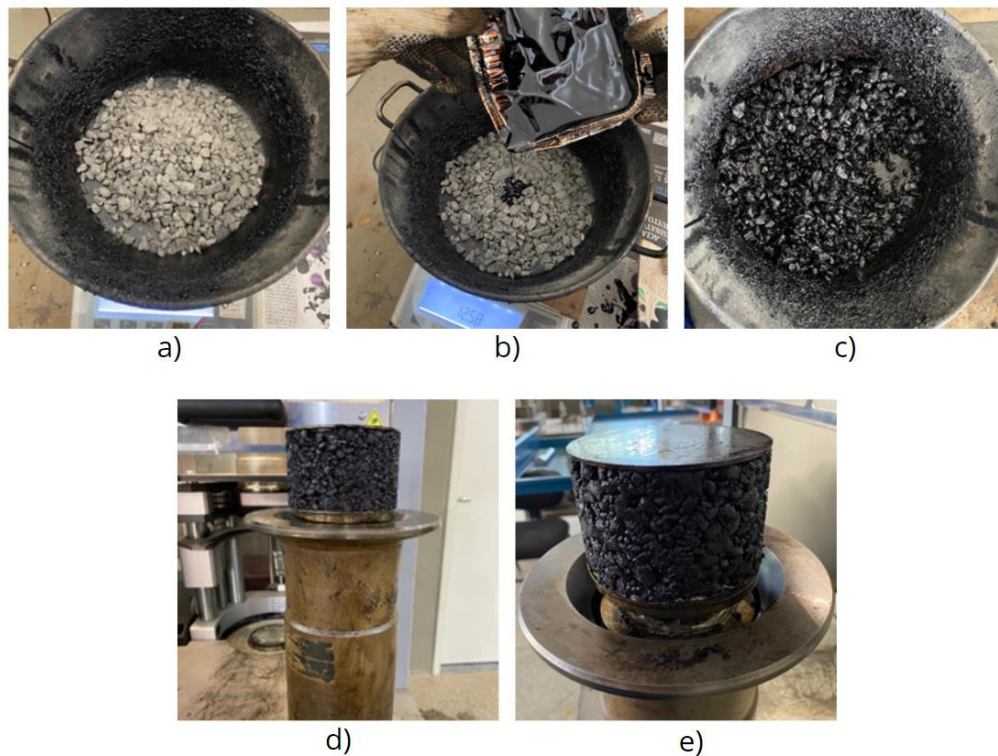
Tabela 12 - Composição granulométrica da Faixa Teste para ensaio de permeabilidade

Peneira de malha Quadrada		Porcentagem passando, em peso
ABNT	Abertura (mm)	Faixa Teste
3/4"	19,0	100
1/2"	12,5	95
3/8"	9,5	70
Nº 4	4,8	15
Nº 10	2,0	7
Nº 40	0,42	6
Nº 80	0,18	-
Nº 200	0,075	3

Fonte: Autoras

A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma do DNIT 178 (2018). As etapas de dosagem são expostas na Figura 24.

Figura 24 - Dosagem (a) Agregado natural sendo pesado; (b) Pesagem do ligante; (c) Mistura dos materiais; (d) CP sendo retirado do molde; (e) CP pronto

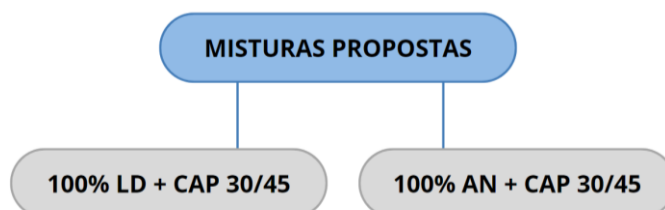


Fonte: Autoras

3.2.2.2. Misturas Propostas

As misturas asfálticas propostas para esse estudo são duas: uma preparada com 100% de agregado LD e outra contendo 100% de agregado natural. Em ambas as misturas foi utilizado o mesmo ligante asfáltico, o CAP 30/45, não modificado. Segundo Meneses (2017), a presença de fibras não possui um efeito significativo em relação ao melhoramento das propriedades hidráulicas da mistura. A Figura 25 apresenta um resumo das misturas propostas para esse estudo.

Figura 25 - Misturas asfálticas propostas



Fonte: Autoras

3.2.2.3. Determinação do volume de vazios

A determinação do volume de vazios (V_v) da mistura é de fundamental importância, pois ela irá assegurar que o corpo de prova produzido estará enquadrado na porcentagem de vazios especificada por norma. O volume de vazios foi calculado a partir da Equação 10 (BERNUCCI et al., 2008).

$$V_v = \left(\frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \right) \times 100 \quad (10)$$

Onde:

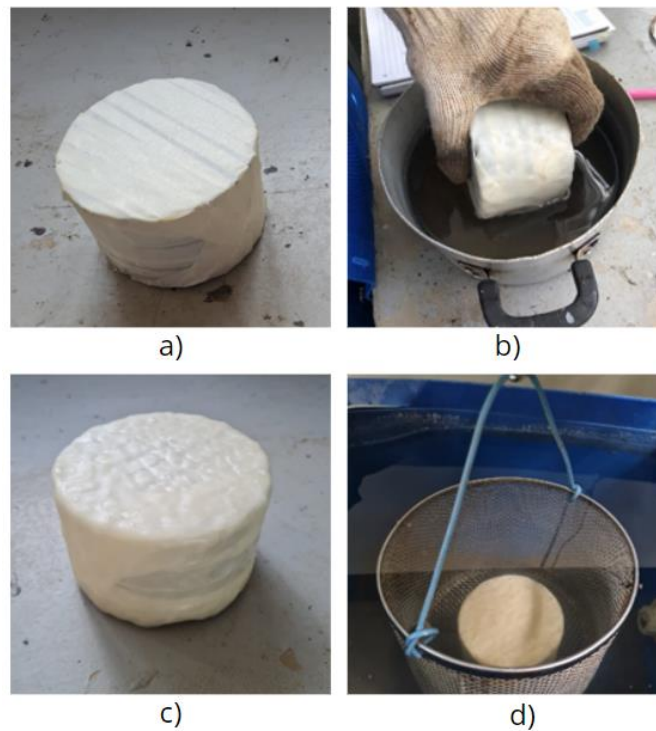
V_v : volume de vazios;

G_{mb} : densidade aparente;

DMT: densidade máxima teórica.

Para determinar a densidade aparente (G_{mb}), os procedimentos descritos pela norma DNER-ME 117 (1994) foram seguidos. A norma estabelece um procedimento particular para os corpos de prova com porcentagem de vazios superior a 10%. Inicia-se o ensaio determinando a sua massa seca. Em seguida, é passada uma fita adesiva envolvendo todo o corpo de prova, pesando-o novamente. O ensaio segue com a aplicação da parafina fluidificada, envolvendo o CP com uma camada impermeável. O conjunto é pesado. Por fim, a amostra envolvida de fita adesiva e parafina é colocada imersa a água, à temperatura ambiente, pesando-a novamente. A Figura 26 exhibe o procedimento descrito.

Figura 26 - Verificação do índice de vazios (a) CP revestido com fita adesiva; (b) CP sendo banhado por parafina; (c) CP envolvido por parafina; (d) CP submerso em água



Fonte: Autoras

O cálculo da G_{mb} é realizado de acordo com a Equação 11.

$$G_{mb} = \frac{P_{ar}}{P_3 - P_4 - \frac{P_2}{d_f} - \frac{P_3 - P_1}{d_p}} \quad (11)$$

Onde:

G_{mb} : densidade aparente;

P_{ar} : peso do corpo de prova determinado ao ar;

P_1 : peso do corpo de prova com a fita adesiva;

P_2 : peso da fita adesiva;

P_3 : peso do corpo de prova com a fita adesiva e recoberto com parafina;

P_4 : peso do corpo de prova com a fita adesiva e recoberto com parafina imerso em água;

d_f : densidade aparente da fita adesiva;

d_p : densidade aparente da parafina.

A densidade máxima teórica é calculada a partir da massa específica real dos materiais que compõem a mistura asfáltica. O cálculo da DMT é realizado de acordo com a Equação 12.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (12)$$

Onde:

DMT: densidade máxima teórica;

$\%a$: percentagem de ligante asfáltico;

$\%Ag$: percentagem de agregado graúdo;

$\%Am$: percentagem de agregado miúdo;

$\%f$: percentagem de fíler;

G_a : massa específica real do ligante asfáltico;

G_{Ag} : massa específica real do agregado graúdo;

G_{Am} : massa específica real do agregado miúdo;

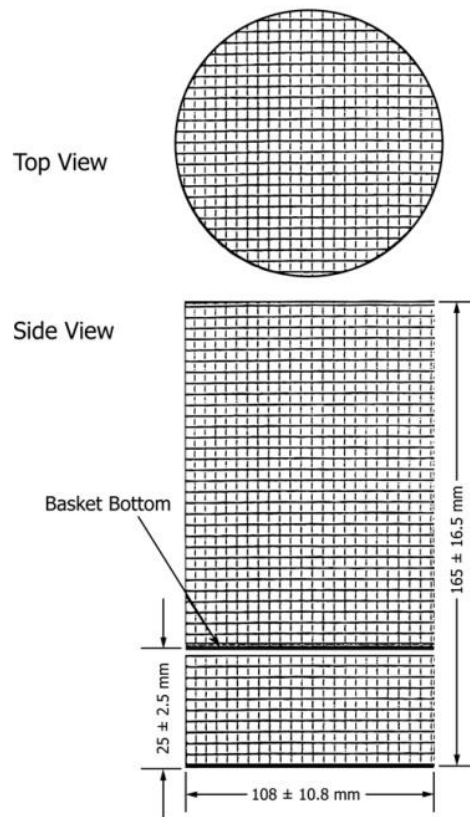
G_f : massa específica real do fíler.

3.2.2.4. Escorrimento do Ligante Asfáltico

O ensaio de escorrimento seguiu os procedimentos da norma ASTM D6390 (2017), e tem por objetivo determinar a quantidade de ligante que escorre em uma mistura de 1200 ± 200 g não compactada, quando submetida a elevadas temperaturas.

O procedimento se iniciou com a separação da amostra. A norma requer que sejam ensaiadas no mínimo duas amostras para cada tipo de mistura, portanto, foram separadas duas amostras contendo escória LD e duas contendo agregado natural. Foi feita a mistura dos agregados com o ligante. Uma vez preparada, a mistura foi colocada em uma cesta de tela de aço com abertura de 6,3mm, conforme apresentado na Figura 27.

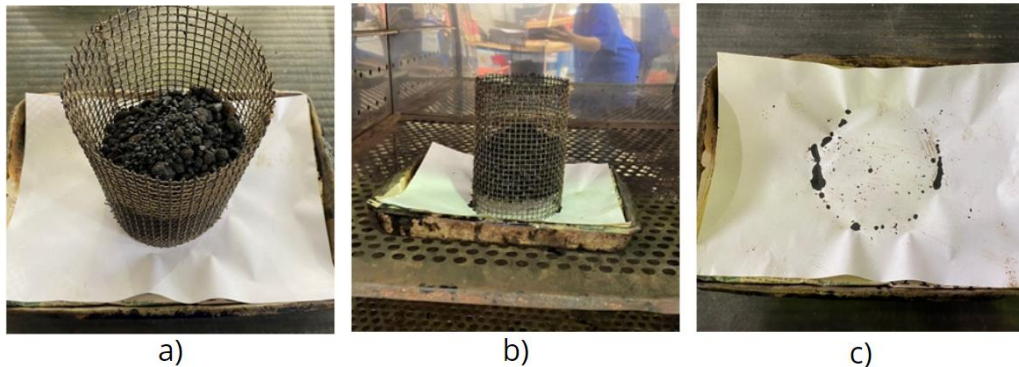
Figura 27 - Cesta especificada pela norma ASTM D6390 para a realização do ensaio de escorrimento



Fonte: ASTM D6390

A cesta contendo a mistura em seu interior foi levada para a estufa por um período de $1\text{h} \pm 5$ min, na temperatura de usinagem da mistura. Ao final desse período retirou-se o conjunto da estufa e foi pesada a quantidade de ligante que escorreu. A Figura 28 apresenta o procedimento realizado. Vale ressaltar que a norma recomenda que o ensaio deve ser realizado também em uma temperatura 10°C acima da temperatura de usinagem, dessa forma, repetiu-se todos os procedimentos descritos ensaiando as amostras nessa temperatura.

Figura 28 - Realização do ensaio de escorrimento (a) Mistura dentro da cesta; (b) Amostra dentro da estufa; (c) Escorrimento do ligante.



Fonte: Autoras

O cálculo do escorrimento do ligante asfáltico foi realizado conforme a Equação 13:

$$Escorrimento = \frac{(D - C)}{(B - A)} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

A: massa da cesta vazia;

B: massa da cesta contendo a mistura;

C: massa da bandeja;

D: massa da bandeja contendo o ligante escorrido.

A norma determina que o valor médio de ligante escorrido não deve passar de 0,3%.

3.2.2.5. Desgaste Cântabro

O ensaio Cântabro foi realizado seguindo os procedimentos da norma DNER-ME 383 (1999), e tem como objetivo medir o desgaste, por abrasão, de misturas asfálticas, por meio do tambor Los Angeles (Figura 29). A norma especifica que a compactação dos corpos de prova produzidos para esse ensaio deve ser Marshall.

Figura 29 - Equipamento Los Angeles utilizado para realizar o ensaio Cântabro



Fonte: Autoras

Inicialmente, o CP foi pesado e em seguida foi colocado no equipamento Los Angeles, sem as esferas abrasivas. O tambor foi fechado e configurado para realizar 300 revoluções, a uma velocidade de 30 r.p.m., à temperatura de 25°C. Completadas as 300 revoluções, a amostra foi retirada e pesada novamente. Na Figura 30 observa-se uma amostra de CP da mistura asfáltica com 100% de escória LD antes e depois da realização do ensaio.

Figura 30 - CP antes (esquerda) e depois (direita) da realização do ensaio Cântabro



Fonte: Autoras

Foram produzidas três amostras de cada tipo de mistura proposta para o ensaio Cântabro, portanto, foram separadas três amostras contendo escória LD e três contendo agregado natural. O cálculo do desgaste da mistura betuminosa por abrasão foi realizado conforme a Equação 14:

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

P = massa do CP antes da realização do ensaio;

P' = massa do CP depois da realização do ensaio.

A norma DNER-ES 386/99 determina que 25% deve ser o valor máximo de desgaste à abrasão das misturas ensaiadas.

3.2.2.6. Ensaio de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado seguindo a norma NBR 13292, cujo objetivo é avaliar a condutividade hidráulica utilizando o princípio de carga constante. Montou-se uma mesa onde na parte superior foi colocado uma tela perfurada e embaixo um balde. O sistema contém um reservatório para manutenção da carga constante, tubos manométricos que possuem escala graduada em milímetros para a medição das cargas hidráulicas e barra de calibração metálica e rígida, com dimensões uniformes e de comprimento superior ao diâmetro do permeâmetro (Figura 31).

Figura 31 - Equipamentos usados no ensaio de permeabilidade; (a) Sistema para realização do ensaio de permeabilidade; (b) Reservatório



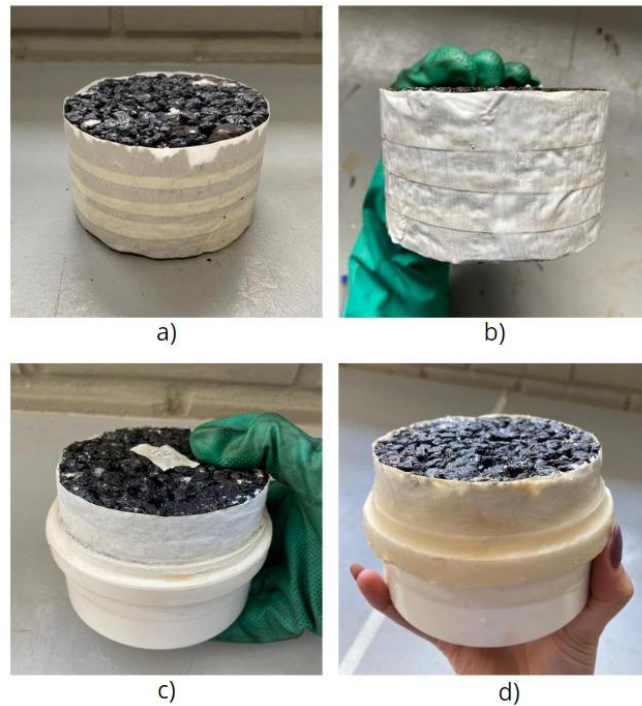
(a)

(b)

Fonte: Autoras

O corpo de prova foi vedado com fita isolante, envolto com duas camadas de impermeabilizante e inserido a um recipiente de PVC, sendo obstruída suas extremidades com parafina, a fim de não ter escape lateral de água (Figura 32). A região inferior do PVC possui uma abertura, por onde será conectada uma das saídas do reservatório de água. Posicionou-se o corpo de prova em cima da tela e foi conectada um dos tubos. A outra saída do reservatório foi conectada ao filtro e a terceira entrada é a alimentação deste reservatório. Dentro dele há um termômetro que mede a temperatura. Com todas as válvulas abertas, espera-se as cargas se estabilizarem, sem apresentar variações significativas nos níveis de água dos tubos manométricos. É medido a diferença nos níveis dos tubos manométricos (Δh), a temperatura (T), o tempo (t) e o volume percolado neste tempo (Q). Este procedimento é realizado três vezes para a mesma altura. Em seguida, aumenta-se a carga mais duas vezes e repete-se o procedimento.

Figura 32 - Preparação da amostra (a) Corpo de prova vedado com fita isolante; (b) CP envolto com duas camadas de impermeabilizante; (c) Amostra inserida no PVC; (d) Amostra com parafina cobrindo suas extremidades



Fonte: Autoras

Os cálculos são obtidos através das Equações (15), (16) e (17).

$$i = \frac{\Delta h}{H} \quad (15)$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (16)$$

$$k = \frac{v}{i} \quad (17)$$

Onde:

i: Gradiente hidráulico;

Δh : variação de carga;

H: altura da amostra;

V: velocidade;

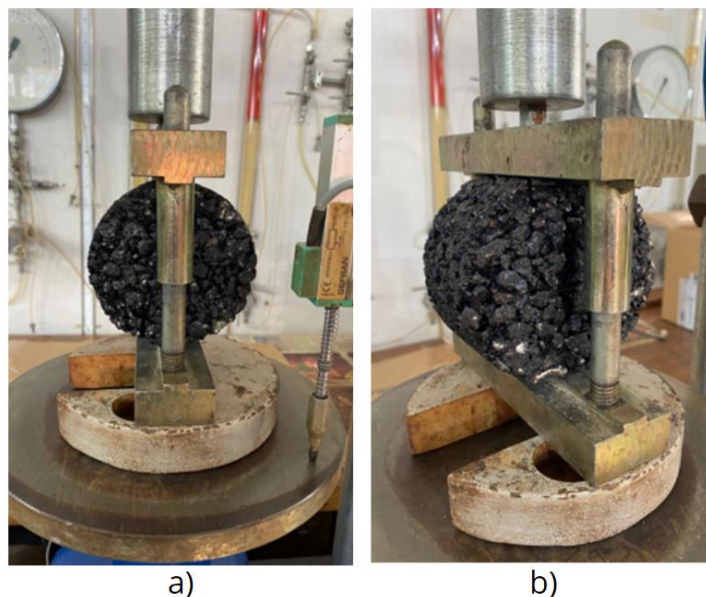
Q: volume percolado;

k: coeficiente de permeabilidade.

3.2.2.7. Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) foi realizado seguindo a norma DNIT 136 (2018), utilizando a prensa mecânica. Antes de executar o ensaio, foi medida a altura e o diâmetro de cada corpo de prova com o paquímetro, em quatro posições equidistantes. Feitas as leituras, os CPs foram colocados em um compartimento por quatro horas, à uma temperatura de $25^{\circ} \pm 0,5$ °C, e, em seguida, ajustados na prensa, onde foram submetidos a uma carga vertical de compressão, com velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s. A carga foi aplicada até a ruptura completa do corpo de prova. Na Figura 33 é possível observar o rompimento da amostra ensaiada.

Figura 33 - Ensaio de RTCD (a) CP ajustado na prensa; (b) CP rompido



Fonte: Autoras

Foram ensaiados três corpos de prova de cada mistura proposta. Com o valor da carga de ruptura obtido através do rompimento na prensa, é calculada a resistência à tração, através da Equação 18:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (18)$$

Onde:

σ_R = resistência à tração;

F = carga de ruptura;

D = média das quatro leituras feitas do diâmetro do CP;

H = média das quatro leituras feitas da altura do CP.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Os resultados da caracterização do ligante asfáltico estão apresentados na Tabela 13. Eles foram realizados de maneira a comprovar que o CAP 30/45 possui as especificações conforme informado no certificado do produto, expostos na Tabela 10.

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico

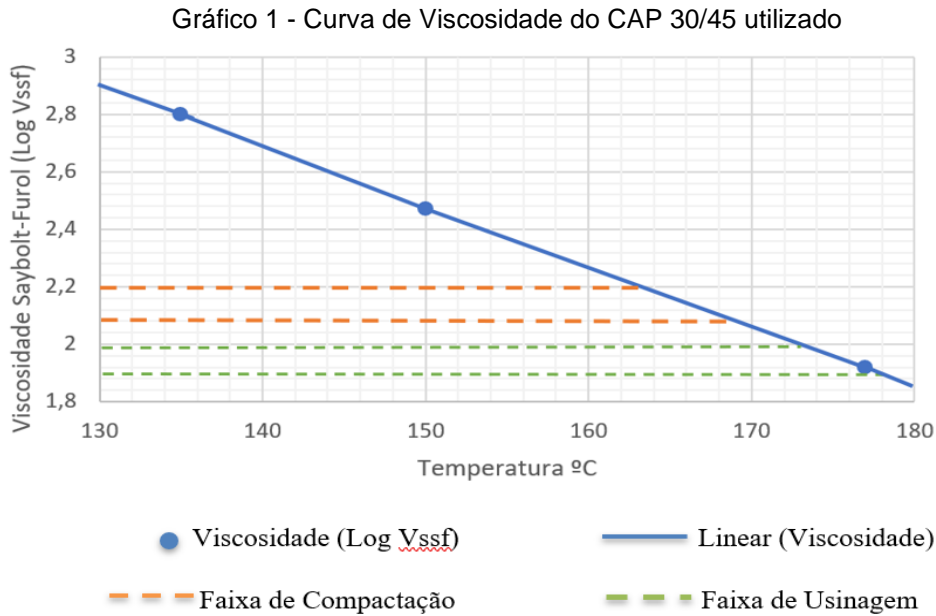
Propriedades do CAP 30/45			
Características	Método	Resultado	Unidade
Penetração	NBR 6576/2007	33	Mm
Ponto de Amolecimento	NBR 6560/2016	49,6	°C
Viscosidade Saybolt-Furol 135°C	NBR 14950/2003	10:38	SSF
Viscosidade Saybolt-Furol 150°C	NBR 14950/2003	4:58,07	SSF
Viscosidade Saybolt-Furol 177°C	NBR 14950/2003	1:21,59	SSF

Fonte: Autoras

Com os dados obtidos foi concluído que alguns resultados foram satisfatórios, como o ensaio de Penetração, que nos garante a classificação do CAP 30/45. A temperatura encontrada no ensaio de amolecimento não foi satisfatória, ficando abaixo da temperatura especificada do material. Acredita-se que essa variação se deve as oscilações do fogo durante o aquecimento da amostra, pois não foi possível ter um controle muito rigoroso devido as limitações dos materiais utilizados no laboratório.

Com base nos resultados do ensaio de viscosidade, foi possível traçar a curva de viscosidade, apresentada no Gráfico 1. Considerando as recomendações para a produção da mistura, ela deve ser realizada quando a viscosidade do ligante estiver entre 0,15-0,19 Pa/s, e a temperatura de compactação deve estar compreendida a uma viscosidade de 0,25-0,31 Pa/s, fornecendo, respectivamente, a faixa de

temperatura que deve ser feita a mistura asfáltica entre o ligante e o agregado, e a temperatura de compactação dos corpos de prova das misturas estudadas.



Para a mistura, a temperatura definida foi de 172,5°C e 178°C, e a faixa de temperatura definida para a compactação dos CPs foi de 163,5°C e 168°C.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os ensaios de caracterização da escória de aciaria têm seus resultados informados na Tabela 14. Os dados obtidos foram comparados com as especificações da norma DNER-EM 262/94, que informa as especificações do uso da escória LD em pavimentos.

Tabela 14 - Caracterização da escória LD e do agregado natural

		Massa Específica Real (g/cm³)	Massa Específica Aparente (g/cm³)	Absorção (%)	Equivalente de Areia (%)	Durabilidade (%)	Abrasão Los Angeles (%)	Adesividade de	pH
DNER-EM 262/94		3-3,5		1-2	-	0-5	<25	-	-
LD	>4,8mm	3,54	3,18	3,20					
	4,8-0,075	3,49	-				22,0	Satisfatório	-
	<0,075mm	-	-						
Agregado Natural	>4,8mm	2,88		0,73					
	4,8-0,075	2,88		1,22		0,6	41,7	Não Satisfatório	9,8
	<0,075mm	2,88			71				

Fonte: Autoras

Com os dados obtidos pode-se concluir que, de maneira geral, a escória LD atende aos requisitos imposto pela norma DNER-EM 262 (1994). Comparando os resultados do coproduto com o agregado natural, observa-se que a massa específica da LD é maior que a massa específica do agregado natural, como era esperado, atendendo ao critério mínimo especificado em norma.

Os valores de perda por abrasão Los Angeles da escória de aciaria estão dentro do limite da norma para este material. Comparando o resultado obtido com outros estudos, observa-se que o valor é próximo ao apresentado por Moura et al. (2020) de 19% e por Kim et al. (2018) que apresentou uma abrasão de 20,1%.

A avaliação do potencial de expansão do agregado siderúrgico foi realizada através da norma DNIT 113 (2009), com três amostras de escória LD. A expansão obtida foi de 1,73%, 2,38% e 1,91%. Os valores encontrados foram baixos, o que evidencia que a escória utilizada foi curada previamente para valores aceitáveis para uso em pavimentação, i.e., menores que 3%.

Em relação adesividade, as amostras de escória apresentaram resultados satisfatórios, com uma adesividade excelente, conforme a Figura 34. A boa adesividade pode ser atribuída à presença de óxidos de ferro, aliado a um teor baixo de sílica. A absorção não teve resultado satisfatório, pois excedeu o limite estabelecido em norma. Essa alta absorção pode ter contribuído para uma deficiência de filme de ligante, atrapalhando a adesividade e a resistência ao desgaste.

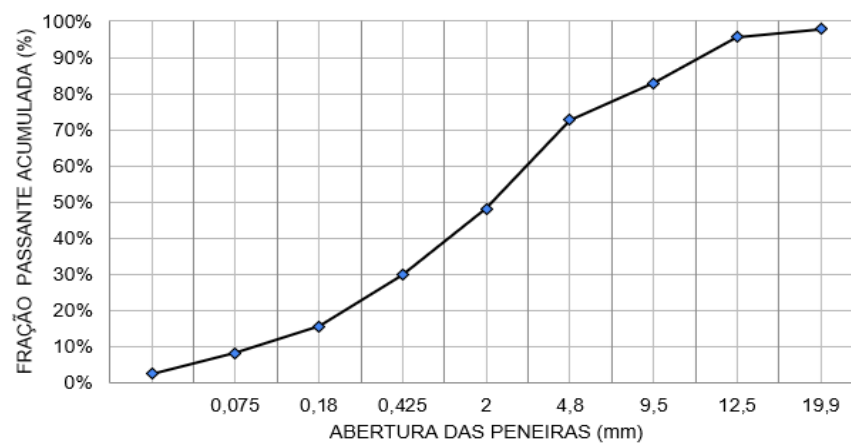
Figura 34 - Resultado do ensaio de adesividade da escória LD



Fonte: Autoras

Além dos ensaios já citados, realizou-se também o ensaio de granulometria da escória LD. O Gráfico 2 apresenta a curva obtida.

Gráfico 2 - Curva granulométrica da escória LD



Fonte: Autoras

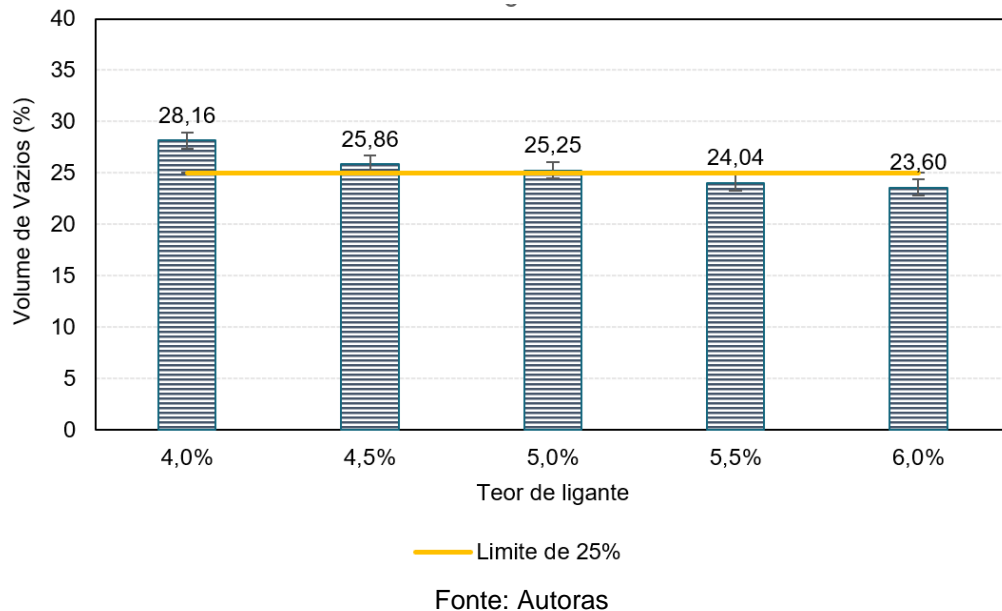
4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.3.1. Dosagem das Misturas Asfálticas

O estudo se iniciou com uma pré-dosagem para verificar qual teor de ligante atenderia o volume de vazios de 18 a 25%, estabelecido pela norma DNER-ES 386

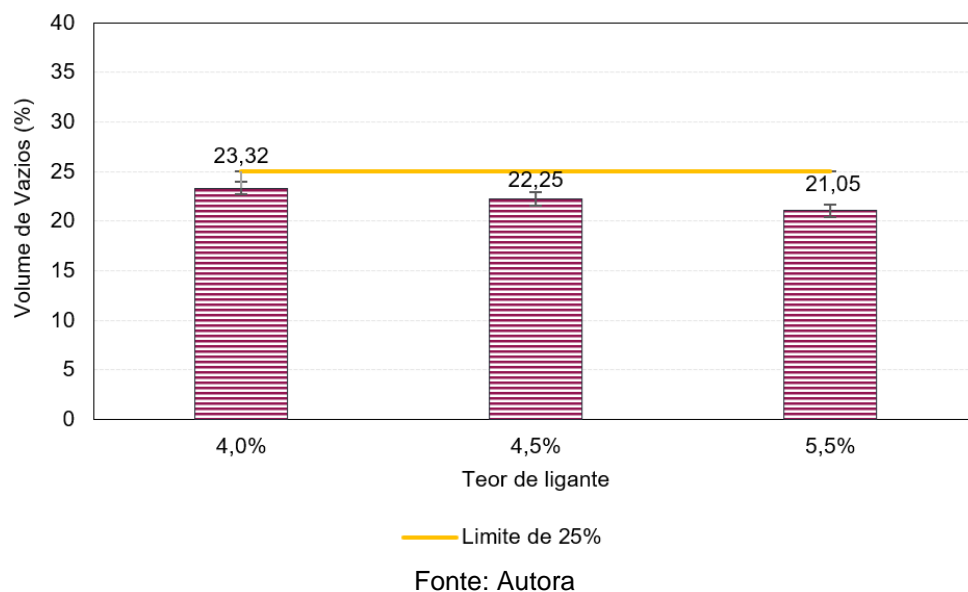
(1999). O Gráfico 3 apresenta o volume de vazios obtido em função dos teores de ligantes testados para as misturas contendo escória LD.

Gráfico 3 - Volume de vazios em função do teor de ligante testados para as misturas contendo escória LD



Da mesma forma, foi realizada uma pré-dosagem testando teores de ligantes para as misturas contendo agregado natural. Os resultados obtidos estão dispostos no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Volume de vazios em função do teor de ligante testados para as misturas contendo agregado natural



Visando atingir o máximo volume de vazios permitido por norma, os teores ótimos de projetos estabelecidos foram de 5,5% para as misturas contendo LD e 4,0% para as misturas contendo agregado natural. Na Tabela 15 estão expostos o teor ótimo de ligante e os parâmetros volumétricos para cada mistura.

Tabela 15 - Teores ótimos de projeto e parâmetros volumétricos das misturas

Propriedades	MISTURA LD	MISTURA AN
Pb (%)	5,50	4,00
Vv (%)	24,04	23,32
RBV (%)	34,48	24,40
VAM (%)	34,74	30,89
DMT	3,13	2,70
Gmb	2,42	2,07

Fonte: Autoras

A partir dos resultados de dosagem, é possível observar o aumento do teor ótimo de projeto das misturas produzidas com escória LD. Isso está relacionado com as características de absorção dos materiais. A absorção encontrada para o agregado siderúrgico é cerca de três vezes maior que a encontrada para o agregado natural, e quanto maior é a absorção do agregado, maior é quantidade de ligante demandada para a produção das misturas. Os estudos de Schumacher (2018) e Frossard (2021) corroboram ao mostrarem que as misturas produzidas com substituição parcial de agregado natural por agregado siderúrgico necessitavam de um maior teor de ligante para atender os parâmetros volumétricos.

Embora os parâmetros volumétricos tenham sido atendidos, é importante destacar que, visualmente, os corpos de prova produzidos com escória LD pareciam ter uma porcentagem de ligante menor quando comparado com os corpos de prova produzidos com agregado natural. A Figura 35 apresenta a comparação dos dois CPs.

Figura 35 - Corpo de prova produzido com escória LD (esquerda) e com agregado natural (direita)



Fonte: Autoras

4.3.2. Escorrimento do Ligante Asfáltico

O ensaio de escorrimento do ligante asfáltico foi avaliado em duas temperaturas, à 175°C, temperatura de mistura, e à 185°C, 10°C acima da temperatura de mistura. Para as misturas estudadas, mesmo utilizando ligante convencional, não se observou um escorrimento considerável, visto que todos os resultados foram menores que 0,001%, bem abaixo do limite de 0,3% estabelecido pela norma.

Apesar de valores baixos de escorrimento estarem ligados às misturas que utilizam fibras como aditivos ou ligantes modificados (Mansour e Putman, 2013), os resultados obtidos nesse estudo e de outros autores se opõem a essa afirmação. As misturas produzidas por Meneses (2017), contendo ligante convencional CAP 50/70, não apresentaram resultados expressivos de escorrimento de ligante. Queiroz (2016) obteve valor de escorrimento de 0,058% para a mistura com ligante convencional, enquanto a mistura produzida com ligante modificado apresentou valor de escorrimento igual a 0,170%.

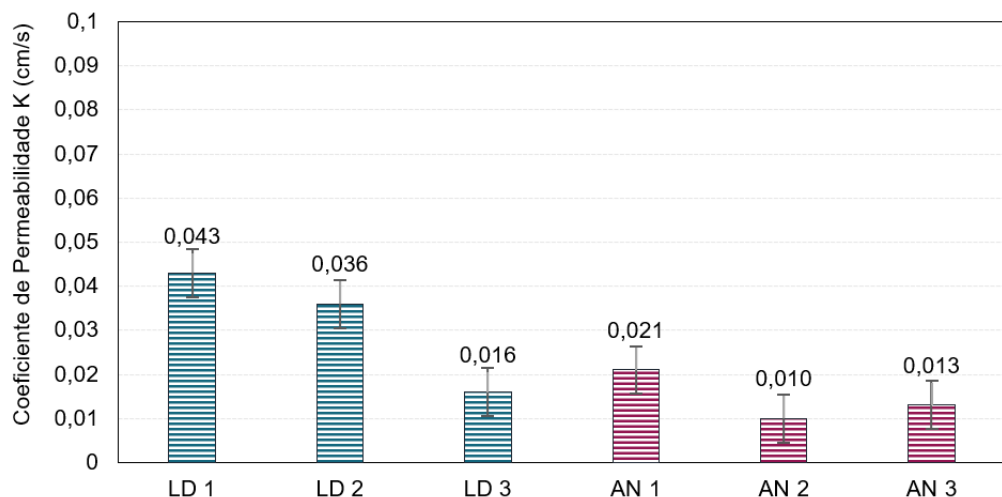
Mallick et al. (2000) testou misturas contendo diferentes percentuais de agregado passante na peneira 4,75 mm. Os valores de escorrimento obtidos foram

1,27%, 0,25%, 0,24% e 0,19%, para as misturas contendo 15%, 25%, 30% e 45% de passante na peneira 4,75 mm. O autor concluiu que quanto maior o percentual de agregado passante na referida peneira, menor será o valor de escoamento da mistura. Entretanto, nesse referido estudo as misturas possuem um percentual passante na peneira 4,75 mm de 22%, e, apesar disso, os valores de escoamento foram desconsideráveis, o que pode estar relacionado com o tipo de ligante utilizado.

4.3.3. Ensaio de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade possibilitou avaliar as propriedades hidráulicas das misturas produzidas. Os resultados obtidos estão plotados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Resultados de “K” para as misturas estudadas



Fonte: Autoras

Os valores encontrados para o coeficiente de permeabilidade (k) ficaram abaixo do valor mínimo de 0,12 cm/s recomendado pela ASTM D7064 (2008). É possível observar que, apesar desses resultados, as misturas com escória LD possuem, em média, o dobro dos valores de permeabilidade que as misturas compostas pelo agregado natural. Uma hipótese levantada está relacionada a diferença da estrutura interna dos corpos de prova. Como a massa específica da escória de aciaria é maior que a do agregado natural, para uma mesma massa, o CP produzido por agregado natural demanda uma maior quantidade de grãos em comparação ao CP produzido

por escória LD. Essa ocorrência tende a obstruir os vazios interconectados presentes no corpo de prova, dificultando a percolação de água na amostra.

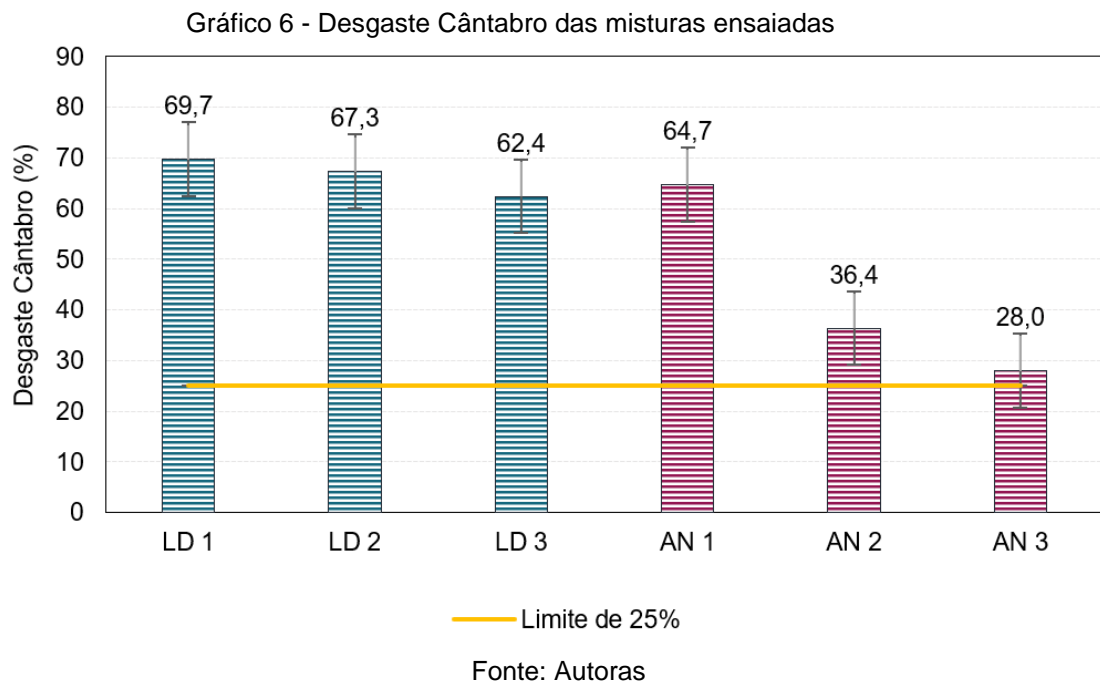
Inicialmente, acreditou-se que a curva granulométrica poderia estar influenciando na baixa drenagem, pois foi comprovado que quanto maior a porcentagem de material passante na peneira de abertura de 4,75mm, menor a permeabilidade. Devido aos resultados obtidos, realizou-se o ensaio com uma mistura teste, que possui maior porcentagem de agregados com granulometria maior e uma diminuição de agregados passantes na peneira 4,75mm. Os resultados foram bem próximos aos expostos com a curva inicialmente utilizada, o que mostra que não foi esse o fator determinante para a drenagem obtida.

Quando comparado aos resultados do estudo realizado por Meneses (2017), que utilizou 5,5% de CAP 30/45 e agregados naturais, com granulometria adotada como sendo a média entre os limites inferiores e superiores da composição granulométrica do Arizona, o coeficiente de permeabilidade obtido foi de, aproximadamente $1,2 \times 10^{-3}$ cm/s, sendo possível observar que os valores de permeabilidade das amostras deste estudo foram superiores (cerca de 10 vezes maiores) dos valores encontrados por Meneses (2017). Embora os valores encontrados ainda não sejam os desejáveis neste estudo, Goh e You (2012) e Shen, Wu e Du (2008) afirmam em seus estudos que misturas que apresentam coeficientes superiores a 0,01 cm/s apresentam boa drenabilidade, na qual se enquadraria os resultados deste estudo.

A faixa granulometria adotada tenderia a proporcionar um CPA com maior coeficiente de permeabilidade, porém não foi suficiente para garantir a permeabilidade desejada. Acredita-se que as características da escória utilizada, que se apresentou de maneira heterogênea, podem ter influenciado nos resultados, bem como o ligante escolhido, que pode ter afetado a interconectividade dos vazios. Nos estudos apresentados na revisão bibliográfica deste trabalho, verificou-se que grande parte das misturas de CPA utilizaram ligante modificado.

4.3.4. Desgaste Cântabro

O potencial de desagregação das misturas estudadas foi avaliado através do uso do equipamento Los Angeles, no ensaio de desgaste Cântabro. O Gráfico 6 apresenta os resultados obtidos para cada amostra ensaiada.



Com a análise dos resultados verifica-se que as amostras contendo escória LD se apresentaram mais suscetíveis ao desgaste, visto que foi observada maior desagregação dos corpos de prova após o ensaio. Ressalta-se que nenhuma mistura se mostrou capaz de resistir ao desgaste perante a norma, dado que essa estabelece um valor máximo igual a 25%.

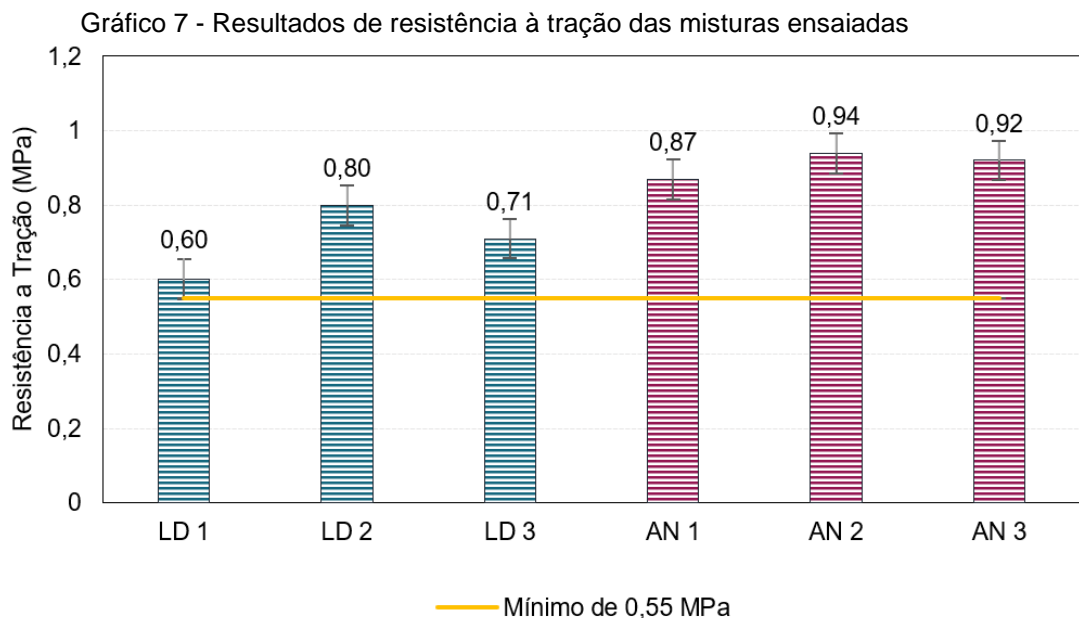
Os resultados obtidos com a realização desse ensaio não eram esperados, uma vez que as misturas produzidas com escória LD apresentam melhor adesividade ao ligante em comparação com as produzidas com agregado natural, o que poderia minimizar os efeitos do desgaste cântabro. Além disso, nos ensaios de caracterização, percebe-se que a escória LD possui menor abrasão que o agregado natural, fato que também pode contribuir para um menor percentual de desgaste da mistura.

Em busca de respostas para justificar os valores encontrados, as autoras verificaram alguns pontos que podem ter contribuído para os resultados apresentados.

Durante a confecção dos corpos de prova, por exemplo, pôde-se perceber uma maior dificuldade no processo de mistura da escória LD com o CAP utilizado. Essa dificuldade não foi percebida ao se misturar o agregado natural, que em poucos minutos já se apresentavam totalmente cobertos por ligante. A partir dessa análise, levantou-se a hipótese de que a amostra da escória que foi usada para a produção dos corpos de prova (que foi proveniente de um saco diferente do utilizado para a caracterização dos agregados na etapa inicial) poderia estar apresentando uma má adesividade ao ligante, colaborando para valores altos de desgaste cântabro.

4.3.5. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados obtidos com o ensaio de resistência à tração por compressão diametral são apresentados na Gráfico 7. Todas as amostras ensaiadas atingiram um valor de resistência à tração (RT) maior que o mínimo de 0,55 MPa estabelecido pela norma DNER-ES 386/99.



Fonte: Autoras

Neste ensaio, os maiores valores de resistência à tração ocorreram com as misturas produzidas com agregado natural. As misturas contendo LD apresentaram

RT médio equivalente a 0,70 MPa, enquanto as misturas contendo agregado natural apresentaram RT médio equivalente a 0,91 MPa.

Mais uma vez, a realização desse ensaio levou a resultados não esperados, visto que o ligante betuminoso apresenta uma melhor adesividade com a escória LD em comparação com o agregado natural, e uma boa adesividade contribui para o aumento da resistência à tração da mistura. Além disso, trabalhos como o de Schumacher (2018) mostram que misturas contendo substituição de 50% de agregado natural por escória LD apresentaram valores de RT maiores em comparação com a mistura produzida com 100% de agregado natural.

No entanto, o uso de escória tende a aumentar a rigidez da mistura, o que pode levar a redução da resistência à tração. Como neste estudo utilizou-se 100% de escória de aciaria, sua alta rigidez pode ter levado a redução da resistência à tração. Misturas produzidas com 50% de agregado siderúrgico ainda possuem a flexibilidade de atender às tensões de tração que são submetidas. Essa flexibilidade já não pode ser encontrada nas misturas contendo 100% de agregado siderúrgico, devido a sua alta rigidez (SCHUMACHER, 2018). Além disso, como observado no ensaio de desgaste cântabro, a escória utilizada na produção dos CPs não apresentava boa adesividade ao ligante.

Ressalta-se que os valores encontrados estão coerentes com estudos de CPA realizados anteriormente. Para as misturas produzidas por Meneses (2017) contendo fibras de celulose e bagaço de cana-de-açúcar (BCA), a RT variou entre 0,676 MPa e 0,870 MPa. Dunke (2005) obteve maiores valores de RT para as misturas produzidas com ligante convencional, variando entre 0,74 MPa e 0,85 MPa.

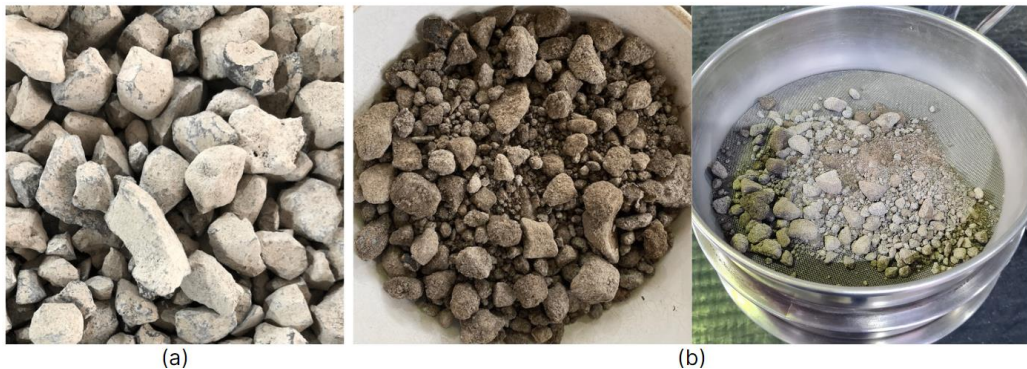
4.3.6. Verificação da qualidade da escória LD utilizada

Durante o período de realização do referente estudo, foi possível perceber uma heterogeneidade dos sacos do mesmo lote de escória LD que foi fornecido, exclusivamente, para esse trabalho. A medida em que os sacos eram abertos, foi possível perceber que a coloração era diferente das amostras e algumas possuíam agregados com grande película de material fino envolvendo sua superfície, fator que

pode comprometer a adesividade. Somando a isso, os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com mistura contendo escória LD não eram esperados, conforme estudos anteriores apresentados no Capítulo 2.3.

Ressalta-se ainda que, a amostra de LD usada para realizar os ensaios de caracterização desse material, apresentava-se visualmente diferente da amostra de outro saco de LD usado para a confecção dos corpos de prova, como pode ser observado na Figura 36. Os resultados iniciais de caracterização indicavam que a mistura poderia obter resultados mecânicos satisfatórios, dado que o agregado siderúrgico apresentou baixa perda por abrasão Los Angeles e boa adesividade ao ligante.

Figura 36 - Diferença visual apresentada pelas amostras de LD utilizadas (a) Amostra usada para os ensaios de caracterização e (b) Amostra usada para a confecção dos CPs



Fonte: Autoras

A partir dos fatos relatados, levantou-se a hipótese de contaminação da escória utilizada, uma vez que esse material, antes de ser entregue para a realização da pesquisa, fica armazenado em grandes pátios na siderúrgica, conforme exibido na Figura 37, e que poderia, por ventura, ter entrado em contato com algum outro tipo de cooproducto.

Figura 37 - Pátio de armazenagem das escórias



Fonte: Autoras

Para confirmar a hipótese de contaminação da escória utilizada, foi repetido o ensaio de adesividade, dessa vez, com a mesma amostra de LD utilizada para a confecção dos CPs.

A Figura 38 apresenta o resultado do ensaio de adesividade realizado com a amostra inicialmente caracterizada no início desse estudo (a) e com a amostra que foram produzidos os corpos de prova (b). É possível perceber, claramente, que em (a) a adesividade é considerada satisfatória, enquanto em (b) insatisfatória, pois percebe-se que o ligante não recobriu totalmente o agregado. A má adesividade apresentada por esse material pode ter resultado a uma menor resistência ao desgaste cântabro e a uma menor resistência à tração.

Figura 38 - Resultados do Ensaio de Adesividade (a) Amostra caracterizada no início do estudo; (b) Amostra de agregado que foram produzidos os corpos de prova



(a)

(b)

Fonte: Autoras

A partir da análise visual, observa-se que a amostra de escória utilizada para confecção de CPs pode ter sido misturada a outros tipos de escórias ou outros coprodutos no pátio de armazenamento do material na empresa, o que culminou a resultados não esperados. Entretanto, para uma verificação mais precisa dessa hipótese, ensaios como o DRX e FRX devem ser realizados, fornecendo a composição química do material estudado.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O referente estudo teve como objetivo avaliar o uso e escória de aciaria LD curada para a produção de camada porosa de atrito. Também foi proposto comparar a diferença de comportamento entre as misturas produzidas com escória LD e com agregado natural. Para isso, as amostras foram analisadas através de ensaios estabelecidos pela norma ASTM D7064/D7064M (2021), buscando verificar seu desempenho frente aos limites aceitos por norma. Diante dos resultados obtidos, é possível concluir que:

- A absorção da escória LD se apresentou maior que a verificada para o agregado natural. Como consequência, as misturas produzidas com o agregado siderúrgico demandam maior consumo de ligante betuminoso quando comparadas com as misturas produzidas com o agregado natural.
- A permeabilidade das misturas não apresentou ao mínimo estabelecido pela ASTM D7064 (2008), em ambas as misturas propostas. Entretanto, a substituição do agregado natural pela escória de aciaria apresentou uma melhor permeabilidade.
- A redução da quantidade de material passante na peneira de 4,75mm resultou em um aumento de permeabilidade, quando comparamos os resultados deste estudo com os de Meneses (2017). No entanto, ainda não foi suficiente para alcançar os valores desejáveis. Contudo, ainda assim observou-se que a mistura estudada se enquadrava na categoria de camada porosa de atrito com boa permeabilidade.
- Com relação ao desempenho mecânico avaliado pela resistência à tração e pelo desgaste cântabro, era esperado um valor superior para as misturas

contendo escória LD, visto que, inicialmente, a adesividade da LD havia se apresentado melhor quando comparado ao agregado natural. Todavia, repetindo o ensaio de adesividade com a amostra de LD que foram confeccionados os corpos de prova ensaiados, pode-se perceber que a adesividade não foi considerada satisfatória, o que justifica os resultados encontrados com a realização dos ensaios mecânicos.

- Com base nos resultados apresentados, o uso de 100% de escória LD com CAP 30/45 (sem modificante) para a produção de CPA ainda não é recomendada devido aos resultados mecânicos obtidos nesse estudo. Todavia, é necessário que seja realizada uma verificação mais profunda quanto a qualidade da escória utilizada. A partir da realização dos ensaios de FRX e DRX, é possível identificar a presença de outro cooproducto misturado com a amostra, afirmando a hipótese de que o material usado para confeccionar os CPs estavam contaminados, podendo, ainda, viabilizar o uso da escória LD para a produção de CPA.
- Para a realização de trabalhos futuros, sugerem-se avaliar o uso de ligante modificado para a produção de CPA contendo escória LD e o efeito da presença de fibras na mistura. Sugere-se também avaliar a permeabilidade de CPAs produzidas com diferentes curvas granulométricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D7064/D7064M – 21: Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Asphalt Mixture Design, ASTM International, 2021.

ASTM D6390 – 11: Standard Test Method for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixture, ASTM International, 2017.

ARAUJO, Paulo Roberto; TUCCI, Carlos E.M; GOLDENFUM, Joel A. Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução do Escoamento Superficial. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n.3, p. 21-29. jul/set 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576. Materiais betuminosos - Determinação da penetração**. Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14950: Determinação da Viscosidade Saybolt Furol**. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560: Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola**. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248: Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12383: Agregado graúdo – Determinação da adesividade ao ligante betuminoso**. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16971: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante**. Rio de Janeiro. 1995

ASSOCIAÇÃO DAS RODOVIAS DO JAPÃO. **Projeto Diretriz da Tecnologia da Pavimentação Drenante**. Publicação do Ministério dos Transportes do Japão. 1996.

ATHAYDE JUNIOR, J. D. G. **Otimização da Injeção de gás inerte no Convertedor MRP-L**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. 2005.

Baltazar, R. P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

BAMUNUARACHCHI, BPDPP; MAMPEARACHCHI, W. K. Investigation of Durability of Open Graded Friction Courses. **Transportation Research Procedia**, v. 48, p. 3696-3705, 2020.

BATTAGIN, A. Ações da indústria de cimento em direção da sustentabilidade– Aspectos ambientais. **Seminário COPEL de sustentabilidade, ABCO**, 2010.

BERTO, Lilian Keylla et al. Análise da relação entre a permeabilidade e as características mecânicas do revestimento asfáltico permeável. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 2, 2018.

Botteon, L. M. **Desenvolvimento e caracterização de concreto permeável para utilização em blocos intertravados para estacionamentos**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal Fluminense. Niterói – RJ. 93p. 2017.

BENEDETTO, A.; UMILIACO, A. Evaluation of hydraulic permeability of open-graded asphalt mixes using a full numerical simulation. **Journal of materials in civil engineering**, v. 26, n. 4, 2014.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros**. Gráfica Imprinta, Rio de Janeiro, 2008.

[BEZERRA] SOUZA, E. B. de O. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2007.

BOTTEON, L. M. **Desenvolvimento e caracterização de concreto permeável para utilização em blocos intertravados para estacionamentos**. 2017. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/5255/1/LET%C3%8DCIA%20MACHADO%20BOTTEON%20111.37.017>>.pdf. Acesso em: 05 abril 2022.

Brown e Cooley, E. RAY, L. A. **Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements. Part1: Summary of Research Results, Part2: Mixture Design Method, Construction Guidelines, and Quality Control/ Quality Assurance Procedures**. NCHRP Report 425. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council. Washington, 1999.

Castro, L. R. **Mezclas Drenantes**. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME). Universidade de Costa Rica. Costa Rica, 2005.

[CAMINHOS] Freitas, S. M. A. C. **Escória de Aciaria: Caminhos para uma Gestão Sustentável. Dissertação de Doutorado**. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2018.

CAMPOS, Octávio de Souza. **Análise do comportamento de trecho piloto de revestimento poroso com asfalto modificado por polímero**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000.

CHOTOLI, F. F., dos Santos, R. F. C., & Guilge, M. S. **Obtenção de clínquer de cimento a partir de escória de aciaria a oxigênio: estudo em escala laboratorial**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2006.

CNT. **Painel CNT de Consultas Dinâmicas dos Acidentes Rodoviários 2021**. Confederação Nacional do Transporte. 2022.

COLERI, Erdem et al. Clogging evaluation of open graded friction course pavements tested under rainfall and heavy vehicle simulators. **Journal of environmental management**, v. 129, p. 164-172, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 113: Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória da aciaria - Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 049: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 117: Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente**. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 262: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários**. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 383: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro**. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084: Agregado miúdo – determinação da densidade real**. 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 386: Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Rio de Janeiro. 1999.

DUMKE, Marilan Pedro. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

Felício, E. A. **Estudo da implementação de conceito da produção enxuta para redução de resíduos em uma manufatura do ramo siderúrgico**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, 2012.

FILHO, Edelino M. **Estudo de Granulometria para Concretos Asfálticos Drenantes**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2001

FROSSARD, R. M., J. E. S. L. TEIXEIRA, and Y. R. KIM. Effects of Aggregate/Filler Characteristics on SCB Fracture Parameters of Asphalt Concrete Mixtures Subject to Moisture Damage. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2022, (in press).

GAL, J. F. Evolution de la Perméabilité des Enrobés Drainants. **Revue Générale des Routes et des Aerodromes**, RGRA nº 702, pp. 118-119, 1992.

IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. Produção Siderúrgica Brasileira, 2019. Disponível em: < <http://www.acobrasil.org.br/site2015/estatisticas.asp>>. Acessado em: 22 de março de 2022.

IZOTON, S. TEIXEIRA, J. E. S. L.; PIRES, P. J. M.; SCHUMACHER, A. G. Evaluation of LD slag expansion effects on the mechanical behavior of asphalt mixtures subject to aging and moisture damage. **Transportes**, 2021. (in press)

KANDHAL, P. S. **Design, construction and maintenance of open-graded asphalt friction courses**. Information Series 115. National Asphalt Pavement Association. Lanham, MD, 2002.

KHATTAK, Asad J.; KANTOR, Paula; CONSELHO, Forrest M. Papel do clima adverso nos principais tipos de acidentes em acesso limitado: implicações rodoviárias para sistemas meteorológicos avançados. **Ficha de Pesquisa em Transportes**, v. 1621, n. 1, pág. 10-19, 1998.

KRAEMER, C. **Porous asphalt: Past and present**. 1997. European Conference on Porous Asphalt. Madrid, Espanha.

Lytton, R. L. **Adhesive Fracture in Asphalt Concrete Mixtures**. Chapter in book edited by J. Youtcheff, In Press. 2004.

Machado, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2000.

MALLICK, Rajid B. et al. Design, construction, and performance of new-generation open-graded friction courses. **National Center for Asphalt Technology**. 2000.

MENESES, João Paulo Costa. **Estudo experimental de parâmetros de dosagem e desempenho de concreto asfáltico poroso com adição de fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. 2017. Dissertação- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

MOURA, B. L. R. DE; TEIXEIRA, J. E. S. L.; SIMÃO, R. A.; KHEDMATI, M.; KIM, Y. R.; PIRES, P. J. M. Adhesion between steel slag aggregates and bituminous binder

based on surface characteristics and mixture moisture resistance. **Construction and Building Materials**, v. 264, 2020.

MOURA, B. L. R.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; PIRES, P. J. M.; SIMÃO, R. A.; KHEDMATI, M.; KIM, Y.R. Avaliação da adesividade ligante-escória de alto forno resfriada ao ar (EFRA) e de aciaria (LD) usando técnicas de análise de superfícies. 2019. In: **ANPET**, Balneário Camburiú. SC, 2019.

NIELSON, Bryant G.; DESROCHES, Reginald. Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach. **Earthquake engineering & structural dynamics**, v. 36, n. 6, 2007.

OLIVEIRA, C. G. M. Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2003, 87p.

Pacheco, R. F. R. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer**. Dissertação (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2017.

PATHAK, S. CHOUDHARY, R. KUMAR, A. SHUKLA, S. Evaluation of Benefits of Open-Graded Friction Courses with Basic Oxygen Furnace Steel-Slag Aggregates for Hilly and High-Rainfall Regions in India. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 32, n.12, p. 1-12, 2020.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processos úmidos e seco)**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2004, 166p.

PROCTOR, D. M.; SHAY, E. C.; FHELING, K. A.; FINLEY, B. L. Assessment of Human Health and Ecological Risks Posed by the Uses of Steel-Industry Slags in the Environment. **Human and Ecological Risk Assessment**. Vol. 8. N° 4. 2002. pp 681 – 711.

Raposo, C. O. L. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2005.

Saade, M. R. M., de Oliveira, B. M., da Silva, M. G., & da Silva, V. G. Aplicação da Análise do Ciclo de Vida na construção civil: discussão sobre alocação de impactos entre o aço e suas escórias. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, 1(6), 97-114. 2011.

Silva, M. J., da Silva Bezerra, A. C., Alves, V. D. J. G., Nunes, T., Almada, S., & Peixoto, R. A. F. Utilização de resíduos da indústria siderúrgica na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. In **Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto**. 2011.

SHI, C. Steel Slag — Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, p. 230–236, 2004.

SCHUMACHER, A. G. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados siderúrgicos nas características do material e no desempenho de misturas asfálticas**. 2018. 94f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória. ES, 2018.

SWART, J. H. **Experiences with porous asphalt in the Netherlands**. 1997. European Conference on Porous Asphalt. Madrid, Espanha.

TEIXEIRA, J. E. S. L.; SCHUMACHER, A. G.; PIRES, P. J. M.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; MARTINS, H. B. **Expansion Level of Steel Slag Aggregate Effects on Both Material**. 2019. Transportation Research Record.

Properties and Asphalt Mixture Performance

UMILIACO, Andrea; BENEDETTO, Andrea. Aggregate size distribution and hydraulic permeability of HMA: a full simulation study. In: **Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements**. 2013. p. 1134-1144.

Virgiliis, A. L. C. **Procedimento de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis visando Retenção e Amortecimento de Picos de Cheias**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 191p, 2009.