

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

SIDINEIDY IZOTON

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA EXPANSÃO DE
AGREGADOS CONTENDO ESCÓRIA DE ACIARIA LD NO
DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
ENVELHECIDAS**

Vitória
2020

SIDINEIDY IZOTON

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA EXPANSÃO DE
AGREGADOS SIDERÚRGICOS NO DESEMPENHO
MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS ENVELHECIDAS
CONTENDO ESCÓRIA DE ACIARIA LD**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Estruturas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira

Co-Orientador: Patrício Jose Moreira Pires

Vitória
2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

I98a IZOTON, SIDINEIDY, 1992-
AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA EXPANSÃO DE
AGREGADOS CONTENDO ESCÓRIA DE ACIARIA LD NO
DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
ENVELHECIDAS / SIDINEIDY IZOTON. - 2020.
115 f. : il.

Orientadora: JAMILLA EMI SUDO LUTIF TEIXEIRA.
Coorientador: PATRÍCIO JOSÉ MOREIRA PIRES.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

I. TEIXEIRA, JAMILLA EMI SUDO LUTIF. II. PIRES,
PATRÍCIO JOSÉ MOREIRA. III. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO A LONGO PRAZO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS CONTENDO ESCÓRIA DE ACIARIA LD EM DIFERENTES NÍVEIS DE EXPANSÃO

Sidineidy Izoton

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **13 de maio** por:

Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora – UFES

Prof. Dr. Patricio José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Coorientador – UFES

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Doutor em Engenharia Civil
Examinadora Interna – UFES

Profa. Dra. Geórgia Serafim Araújo
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Externa - IFES-ES

Vitória – ES, maio de 2020

RESUMO

Alternativas sustentáveis de materiais para pavimentação têm sido cada vez mais estudadas para minimizar a extração de agregados naturais de jazidas e reaproveitar coprodutos e resíduos já disponíveis em pátios ou aterros. As escórias de aciaria têm se mostrado viáveis tecnicamente por possuir características físicas e mecânicas semelhantes ou até superiores às de agregados britados de origem natural. No entanto, sua utilização ainda é limitada dada a sua natureza expansiva, que pode levar ao aparecimento de trincas precoces em pavimentos. Dessa maneira, este trabalho avalia a influência da expansão de escórias de aciaria no desempenho de misturas asfálticas a longo prazo. Três amostras de escória de aciaria do tipo LD com níveis de expansão distintos (1,63%, 2,31% e 5,92%) foram submetidas à caracterização física, mecânica e morfológica para avaliar os efeitos da expansão nas propriedades individuais do material. Após isso, foram produzidas quatro misturas asfálticas, sendo uma com 100% de agregado natural e outras três com substituição de 25% do agregado natural por escória LD em diferentes níveis de expansão. Para a análise dos efeitos da expansão a longo prazo foram adotados diferentes métodos de envelhecimento (ao ar livre e em estufa) e realizados ensaios de resistência à tração. Também foram realizados ensaios de dano por umidade induzida (DUI) visto que a água e o calor são os responsáveis por expansão do agregado siderúrgico. Por último, foram realizados ensaios de expansão na composição de agregados extraídos de misturas asfálticas após envelhecimento e condicionamento do DUI. Observou-se que o processo de expansão da escória de aciaria altera algumas de suas propriedades, principalmente a absorção. Misturas asfálticas utilizando escória LD com expansão maior que 3% apresentaram menores valores de resistência à tração e ao DUI em relação as demais misturas estudadas. Os resultados de expansão de agregados extraídos de misturas condicionadas mostraram que os efeitos expansivos podem ser minimizados em misturas asfálticas. Em geral, observou-se que para os percentuais de substituição avaliados neste trabalho, o desempenho mecânico foi similar ao das misturas com 100% de agregado natural e apresentando resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Escória de aciaria, expansibilidade, envelhecimento, dano por umidade induzida, misturas asfálticas.

ABSTRACT

Sustainable alternatives for paving materials have been increasingly studied to minimize the extraction of deposits and to reuse by-products and waste already available in yards or landfills. Steel slag has been shown to be technically viable as it has physical and mechanical characteristics similar or even superior to those of crushed aggregates of natural origin, such as granite rocks. However, its use is still limited due to its expansive nature, which can lead to the appearance of early cracks in pavements. Thus, this work evaluates the influence of the expansion of steel slag on the performance of asphalt mixtures in the long term. Three samples of LD type steelmaking slag with different expansion levels (1.63%, 2.31% and 5.92%) were submitted to physical, mechanical and morphological characterization to be evaluated the effects of the expansion on the individual properties of the material. Furthermore, four asphalt mixtures were produced, one with 100% natural aggregate and the other three with replacement of 25% of natural aggregate by LD slag at different levels of expansion. For the analysis of the different levels of long-term expansion, different aging methods were adopted (outdoors and in laboratory), and tensile strength tests were performed. Moisture-induced damage tests (MID) were also carried out to verify how the mixtures behave, since water and heat are responsible for the expansion of the steel aggregate. Finally, expansion tests were carried out on the composition of aggregates extracted from asphalt mixtures after aging and conditioning of the DUI. It was observed that the slag expansion process changes some of its properties, highlighting the absorption. Asphalt mixtures with LD with expansion greater than 3% presented lower values of tensile strength and MID compared to other studied mixtures. In general, for the replacement percentages evaluated in this work, the mechanical performance was similar to that of mixtures with 100% natural aggregate and showing satisfactory results.

Keywords: steel slag, expandability, aging, moisture-induced damage, asphalt mixtures.

AGRADECIMENTOS

Chega a hora de agradecer a todas as pessoas que fizeram parte da realização desta pesquisa, muitas pessoas contribuíram mesmo que de modo bem simples ou com grande ajuda.

Dentre essas pessoas que ajudaram na realização desta pesquisa quero começar agradecendo as pessoas que passaram pelo laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES durante minha pesquisa, dentre eles os monitores que me auxiliavam no laboratório, alguns deles hoje até cursando o mestrado, a Natália que hoje nem se encontra mais no laboratório mas foi de grande ajuda enquanto estive no laboratório, as alunas de iniciação científica, ao Felipe e ao Adenis que sempre nos davam suporte quando precisávamos de alguns ou muitos reparos em equipamentos do laboratório para realização de ensaios.

Gostaria de agradecer a empresa Arcelor Mittal Tubarão, pelo apoio financeiro, por investir e acreditar na pesquisa, com a finalidade de dar uma melhor utilização aos seus coprodutos.

Agradeço ao meu coorientador, e chefe do laboratório, professor Dr. Patrício Pires, obrigado por se dedicar em melhorar cada vez mais a estrutura do laboratório para melhor desenvolvimento das pesquisas, e aos conselhos a mim inferidos nesses mais de 5 anos trabalhando juntos.

Agradeço minha orientadora, professora Ph.D Jamilla Lutf Teixeira, por me direcionar na pesquisa mostrando e apresentado soluções para problemas oriundos da pesquisa. Mesmo estando em outro continente durante parte da realização desta pesquisa estava presente em nossas reuniões por vídeo conferência, sempre pronta a me auxiliar quando precisava.

Aos meus pais, Sebastião e Shirley e irmão Sidioney, que mesmo em outra cidade ajudavam nem que fosse para escutar minhas reclamações de quando a pesquisa não andava dando conselhos e passando um pouco das suas sabedorias. Um obrigado mais que especial para mulher que ficou minha noiva no decorrer dessa dissertação, Gabriela, muito obrigado por ser minha amiga, companheira e noiva, e

estar presente em todos os momentos difíceis da minha vida, me apoiando e me incentivando a nunca desistir. Obrigado por ser essa pessoa maravilhosa que você é e muito obrigado por tudo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Envelhecimento da mistura asfáltica	26
Figura 2 - Resultados do ensaio de MR de BELL, 1994	29
Figura 3 - Resultados do ensaio de MR de Leite 2010	30
Figura 4 - Diagrama de produção do aço	33
Figura 5 - Geração específica de coproduto e resíduos (Kg/t)	35
Figura 6 - Destinação de coprodutos e resíduos	35
Figura 7 - Geração de coprodutos e resíduos por tipo	36
Figura 8 - Destinação das escórias de alto-forno 2014/2015	36
Figura 9 - Destinação das escórias de aciaria e outras escórias 2014/2015.....	37
Figura 10 - Carregamento do Convertedor LD	38
Figura 11 - Forno elétrico a arco	38
Figura 12 - Material imerso em água aquecida	43
Figura 13 - Material em estufa ventilada	43
Figura 14 - Gráfico resultante do PTM	44
Figura 15 - Valores Módulo de rigidez à tração indireta das misturas de controle e asfalto de escória de aço	45
Figura 16 - Valores de rigidez de fluência das misturas de controle e asfalto de escória de aço.....	45
Figura 17 - PTM Modificado realizado com as misturas CAUQ_25%LD e CAUQ_100% AN em três níveis de expansão	47
Figura 18 - Resultados do teste de água fervente.....	48

Figura 19 - Dynamic modulus test. (a) European Standards Tester (IPC Global); (b) Amostra com LVDT	50
Figura 20 – Curvas mestre à temperatura de referência de 5 C do a) módulo dinâmico, b) log do módulo dinâmico	50
Figura 21 - Pedreira Brasitália.....	51
Figura 22 - Amostra LD	52
Figura 23 – Amostra de CAP fracionada.....	53
Figura 24 - Granulometria LD.....	55
Figura 25 - Granulometria LD quando coletada	56
Figura 26 - Granulometria LD após ser corrigida	56
Figura 27 - Ensaio de equivalente de areia	59
Figura 28 - Ensaio de adesividade na estufa	60
Figura 29 - Difrátômetro de raios-X	62
Figura 30 - Ensaio de PTM.....	63
Figura 31 - Extração de ligante	64
Figura 32 – Fluxograma de envelhecimento	67
Figura 33 - Envelhecimento de mistura solta em estufa.....	68
Figura 34 - Mapa ilustrando o tempo de envelhecimento baseado no clima de cada país (Kim et al., 2018, pag. 74)	69
Figura 35 - Envelhecimento de corpos de prova compactados.....	70
Figura 36 - Envelhecimento ao ar livre.....	70
Figura 37 - Variação de temperatura.....	71
Figura 38 - Variação de umidade	72

Figura 39 - Ensaio de Compressão diametral	74
Figura 40 - Etapas dos Ensaio de dano por umidade induzido	75
Figura 41 - Saturação dos CPs	76
Figura 42 - Condicionamento dos CPs:.....	76
Figura 43 - Resultados do ensaio de potencial de expansão	77
Figura 44 – Granulometria agregado natural.....	79
Figura 45 - Granulometria LD após ser corrigida	79
Figura 46 - Difratoograma do ensaio de DRX para amostra de LD>3%.....	80
Figura 47 - Resultados de resistência à tração	87
Figura 48 - Altura dos CPs ao longo do tempo.....	88
Figura 49 – Resultado de RRT para CPs submetidos a 1 ciclo de DUI envelhecidos ao ar livre.	91
Figura 50 - Resultado de RRT para CPs submetidos a 1 ciclo de DUI envelhecidos em estufa.	92
Figura 51 - Resultado de RRT para CPs submetidos a 5 ciclo de DUI envelhecidos ao ar livre.	95
Figura 52 - Dano por umidade induzido, Env. em estufa, 5 ciclos.....	95
Figura 54 - Expansibilidade da mistura 25% LD e 75% AN.....	96
Figura 55 - Expansibilidade da mistura depois da extração com solvente.	97
Figura 56 - Expansão após envelhecimento ao ar livre.....	97
Figura 57 - Expansão após CP envelhecimento	98
Figura 58 - Expansão após envelhecimento a Curto prazo.....	98
Figura 59 - Expansão após envelhecimento a Curto prazo.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Simulação de Envelhecimento do CAP em Laboratório	28
Tabela 2 - Comparação entre métodos de envelhecimento	31
Tabela 3 - Composição química das escórias de aciaria de acordo com alguns estudos.....	39
Tabela 4 - Fatores e mecanismos que influenciam a expansibilidade	41
Tabela 5 - Características do CAP 50/70	53
Tabela 6 - Composição das misturas utilizadas	65
Tabela 7 - Resultado da caracterização da escória LD em diferentes níveis de expansão.....	78
Tabela 8 - Composição mineralógica dos agregados.	81
Tabela 9 - Composição mineralógica percentual das amostras de LD	82
Tabela 10 - Principais compostos da escória de aciaria LD	83
Tabela 11 - Resultados de resistência à tração, envelhecimento a curto prazo.....	84
Tabela 12 - Resultados de resistência a tração, mistura envelhecimento a longo prazo	84
Tabela 13 - Resultados de resistência a tração, CP envelhecimento a longo prazo .	85
Tabela 14 - Resultados de resistência a tração, CP envelhecimento 3 meses ao ar livre.....	85
Tabela 15 - Resultados de resistência a tração, CP envelhecimento 6 meses ao ar livre.....	86
Tabela 16 - Resultados de resistência a tração, CP envelhecimento 12 meses ao ar livre.....	86

Tabela 17 - Valores de RT para CPs submetidos a 1 ciclo de DUI (continua).	89
Tabela 18 - Valores de RRT para CPs submetidos a 5 ciclos de DUI (continua).....	93
Tabela 19 - ANOVA – influência do tipo de mistura e do envelhecimento na resistência à tração para 25%LD<3%	100
Tabela 20 - ANOVA – influência do tipo de mistura e do envelhecimento na resistência à tração para 25%LD \cong 3%	101
Tabela 21 - ANOVA – influência do tipo de mistura e do envelhecimento na resistência à tração para 25%LD>3%	101
Tabela 22 - Comparação múltipla de médias da resistência à tração para 25%LD<3%	102
Tabela 23 - Comparação múltipla de médias da resistência à tração para LD \cong 3%	103
Tabela 24 -Comparação múltipla de médias da resistência à tração para LD>3% .	104
Tabela 25 - Comparação múltipla de médias	105

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AN – Agregado Natural
B0 – Brita 0
B1 – Brita 1
BOF – *Blast Oxygen Furnace*
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
CCAB – Centro de Coprodutos Aço Brasil
CP – Corpo-de-prova
DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX – Difração de Raios X
DUI – Dano Devido à Umidade Induzida
EAF – *Electric Arc Furnace*
FAE – Forno de Arco Elétrico
FRX – Fluorescência de Raios X
IABR – Instituto Aço Brasil
LD – *Linz-Donawitz*
LVDT – Transdutores de Deslocamento Variável Linear
MR – Módulo de Resiliência
NBR – Norma Brasileira
OH – *Open Heart*
PP – Pó de Pedra
PTM – Pennsylvania Testing Method
RBV – Relação Betume-Vazios
RRT – Resistência à tração Retida
RT – Resistência à Tração
RTc – Resistencia a Tração condicionada
RTCD – Resistencia à Tração por Compressão Diametral
RTFOT – *Rolling Thin-Film Oven Test*
TP – Teor de Projeto
UV – Ultravioletas

WMA – Misturas Asfálticas Mornas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	21
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivo Geral.....	23
1.2.2	Objetivos Específicos	23
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	PROCESSO DE ENVELHECIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	25
2.2	INDÚSTRIA SIDERÚRGICA	32
2.3	COPRODUTOS E RESÍDUOS.....	34
2.3.1	Escória de Aciaria LD	37
2.3.2	Expansibilidade do Agregado Siderúrgico LD.....	40
2.4	ALGUNS ESTUDOS DESENVOLVIDOS SOBRE ESCÓRIA LD NA PAVIMENTAÇÃO	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	MATERIAIS	51
3.1.1	Agregado Graúdo e Miúdo.....	51
3.1.2	Escória LD	52
3.1.3	Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	53
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS	54
3.2.1	Granulometria dos agregados DNER-ME 083/94.....	55
3.2.2	Desgaste por Abrasão Los Angeles – DNER-ME 035/98.....	57
3.2.3	Massa Específica, massa específica aparente e absorção – ABNT NBR 6458/2016	57
3.2.4	Massa unitária DNER-ME 152/95.....	58

3.2.5	Equivalente de areia DNER-ME 054/97	58
3.2.6	Durabilidade ao sulfato de sódio DNER – ME 089/94	59
3.2.7	Adesividade DNER-ME 078/94.....	59
3.2.8	Difração de Raios-X (DRX).....	60
3.2.9	Fluorescência de Raios-X (FRX)	62
3.2.10	Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria LD- DNIT 113/2009 – ME.....	62
3.3	MISTURAS ASFÁLTICAS.....	65
3.4	MÉTODOS EMPREGADOS PARA AVALIAR MISTURAS ENVELHECIDAS 66	
3.4.1	Envelhecimento a Longo Prazo.....	67
3.4.2	Corpo de prova compactado e envelhecido ao ar livre.....	70
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS EM CONCRETO ASFÁLTICO	72
3.5.1	Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)	73
3.5.2	Dano por umidade induzido - DNIT 180/2018 – ME.	74
4	RESULTADOS.....	77
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	77
4.1.1	Potencial de Expansão	77
4.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	80
4.3	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX).....	81
4.4	RESISTENCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS ESTUDADAS	83
4.5	ANALISE GEOMETRICA DOS CPs ENVELHECIDOS AO AR LIVRE	88
4.6	DANO POR UMIDADE INDUZIDO – DUI	88
4.7	EXPANSIBILIDADE DO AGREGADO SIDERURGICO	96
4.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	100
4.8.1	Análise estatística da influência da expansão:	104
5	CONCLUSÕES	106

5.1	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	108
6	REFERÊNCIAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

A área de infraestrutura rodoviária do país tem limitações e desafios, pois, há escassez de materiais de boa qualidade, ou que estejam disponíveis na região onde se está executando as obras. Com isso, o custo de implantação aumenta, por necessidade do transporte de materiais de outras regiões, ou por se fazer necessário a incorporação de materiais mais onerosos para apresentar uma boa qualidade e segurança do pavimento a ser construído.

Na procura por novos materiais, encontra-se a utilização de resíduos, gerado por diversos setores industriais. Alguns resíduos são nomeados de coprodutos, devido ao valor agregado que ainda apresentam para outros seguimentos, como na construção civil por exemplo. Um dos coprodutos de maior geração no país, é a escória oriunda do processo de fabricação do aço. Dados do relatório de sustentabilidade apresentado pelo Centro de Coprodutos Aço Brasil (CCAB), mostram que a geração total de coprodutos e resíduos diretos da indústria siderúrgica em 2015, foi de 19,8 milhões de toneladas (IABR, 2018).

Com o grande volume produzido de coprodutos e resíduos de aciaria, tem-se a necessidade do reaproveitamento destes materiais. Dentre os setores que poderiam absorver parte desses materiais, encontra-se a construção civil, que demanda de uma grande quantidade de material nas construções de estradas. Além do correto dimensionamento das camadas de pavimento, é importante que sejam utilizados materiais que possam, quando combinados, suportar as cargas procedentes do tráfego planejado.

Uma possibilidade para substituição parcial dos agregados nas camadas de revestimento, é a utilização do coproduto siderúrgico, em especial a escória de aciaria do tipo LD. Devido apresentar resistência à abrasão e durabilidade alta, comparando os agregados naturais (SCHUMACHER, 2018), o agregado siderúrgico já foi utilizado em misturas do tipo SMA, concreto denso, e até para base e sub-base de pavimentos, apresentando resultados satisfatórios.

Um aspecto negativo da utilização da escória LD, poderia ser o potencial expansivo do material devido ao processo de hidratação. Respectivo, principalmente, à

concentração de óxidos de cálcio e magnésio livres, CaO e MgO, a expansão volumétrica das escórias LD, podem chegar a até 10%, inviabilizando o seu uso em pavimentação (PARENTE et al, 2003). Porém, este potencial pode ser reduzido a valores aceitáveis de acordo com normas nacionais e internacionais vigentes, através de um processo de cura que consiste na hidratação do coproduto, em um período de 3 a 6 meses (PARENTE et al, 2003). No entanto, a necessidade de se curar quando este coproduto é envolvido por ligante asfáltico é questionada no presente estudo.

Schumacher (2018), verificou que misturas asfálticas densas produzidas com substituição parcial (25% em massa) de agregado natural por escória LD, pode ser viável para a construção de pavimentos asfálticos, e que na maioria dos casos demonstram um desempenho mecânico igual ou superior àqueles encontrados para misturas asfálticas preparadas integralmente com agregado natural. Foi verificado também, que os efeitos da expansão do material não afetam nem as características volumétricas, nem mecânicas estudadas, mesmo para escórias LD com índices de expansão superiores a 3%, valor máximo de expansão exigido pela norma do DNIT 407/2017 para uso em pavimentação. Entretanto, o autor somente avaliou o desempenho de misturas asfálticas a curto prazo.

Sabe-se que uma das principais causas para a redução da vida útil dos pavimentos flexíveis, é devido ao aparecimento precoce de trincas ao longo da estrutura. Estas, são resultados de ações do ambiente (chuvas e variações de temperatura), bem como, do efeito repetitivo do tráfego. Somam-se a ações externas, as mudanças no comportamento dos materiais asfálticos a curto e longo prazo, devido ao envelhecimento das misturas. O envelhecimento de misturas asfálticas, ocorre durante a etapa de usinagem, aplicação na pista, e ao longo da vida útil da estrutura de pavimento. Os mecanismos de envelhecimento se originam devido à várias causas, sendo a principal delas a oxidação que, entre outros efeitos, causa o aumento da rigidez do ligante asfáltico e, conseqüentemente, o aumento de rigidez da mistura asfáltica. O aumento da rigidez a longo prazo, é um efeito inerente ao comportamento do ligante asfáltico, devido a mudanças químicas (perda de voláteis) que ocorrem durante a vida útil do pavimento. Porém, um aumento excessivo de rigidez, especialmente em condições de tráfego pesado, pode levar ao aparecimento

de trincas precoces, resultando na diminuição da vida útil do revestimento asfáltico. A avaliação dos efeitos do envelhecimento do ligante e das misturas asfálticas no desempenho das estruturas de pavimento, é um desafio aos técnicos rodoviários (MORILHA JUNIOR, 2004).

Dessa forma, se faz necessário entender os efeitos da expansão no desempenho de misturas asfálticas a longo prazo. Atualmente, existe um preconceito de utilizar esse material, pois não se sabe qual será seu comportamento a longo prazo. Julga-se embasamento científico, e com base em casos de insucesso, devido a sua natureza expansiva, resulta-se em tensões internas que levam ao trincamento precoce do pavimento como descritos nos trabalhos de Tavares et. al (2011), e Pinheiro Neto et.

Isto posto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar tecnicamente a viabilidade do uso de escória de aciaria do tipo LD, como substituto parcial do agregado natural para misturas asfálticas, avaliando o desempenho de misturas e efeitos da expansão inerentes a este material a longo prazo.

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Dentre as razões da degradação das rodovias, se encontra o envelhecimento do material asfáltico da camada de revestimento, por estar sujeito a intempéries e a variações de temperatura ao longo de sua construção e de sua vida útil. O acréscimo da rigidez na camada de revestimento, é a consequência mais direta do envelhecimento de misturas asfálticas. Isso pode causar uma redução na resistência à fadiga de misturas e, conseqüentemente, resultar no aparecimento precoce de trincas, reduzindo a vida útil do pavimento. Porém, também, pode causar uma maior resistência à deformação permanente.

Países como Grã-Bretanha, Alemanha, Polônia, França, Japão, Estados Unidos e Rússia utiliza a escória de aciaria, sozinha ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos. Pavimentos construídos com escória suporta tráfego pesado, como por exemplo, o transporte de placas de aço (BRANCO, 2004). No entanto, no Brasil este uso teve início em 1986 com a execução de 100 quilômetros de base e sub-base no estado do Espírito Santo, baseado em informações

disponíveis (SILVA, 1994), porém seu uso para produção de misturas asfálticas ainda é pouco conhecido.

Devido, principalmente, à sua natureza expansiva e a insuficiência de critérios técnicos para determinar sua estabilização no uso de escória na pavimentação nacional, ainda é limitado. Além do CaO e MgO, já mencionados, a presença de ferro metálico também gera expansão, geralmente com um efeito relativamente menor, se comparado ao do óxido de cálcio e magnésio. Essa expansão ocorre por reações de oxidação do Fe^0 , formando compostos como Wustita (FeO), hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), e reações de corrosão, formando compostos como o hidróxido ferroso $[Fe(OH)_2]$ e hidróxido férrico $[4Fe(OH)_3]$. Com o aumento volumétrico das partículas, geram-se tensões internas que levam ao surgimento de trincas (ALEXANDRE et. al, 1993; GEISELER e SCHLOSSER, 1988; MOTZ e GEISELER, 1998; GUMIERI et. al, 2000; MACHADO, 2000; SAHAY et. al, 2000; ÂNGULO et. al, 2001 apud POLESE, 2007).

Existe um número considerável de estudos internacionais, que mostram os efeitos do uso de escórias como agregado em misturas asfálticas. Porém, grande parte destes se limitam a avaliações de propriedades de desempenho em misturas envelhecidas a curto prazo, AMELIAN et. al, 2018; CHEN, J. e WEI, S., 2016; LI et. al, 2016; HUANG et. al, 2012; XIE et. al, 2013; WU et. al, 2017, sendo encontrado poucos estudos que mostrem os efeitos da expansão a longo prazo (ZIAEE et. al, 2015). A motivação desta pesquisa foi devido à necessidade de maior conhecimento sobre os efeitos da expansão de escórias de aciaria do tipo LD no processo de envelhecimento a longo prazo das misturas asfálticas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é verificar a influência do nível de expansão de escória de aciaria LD no comportamento mecânico de misturas asfálticas envelhecidas a curto e longo prazo.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral dessa pesquisa, serão realizados os objetivos específicos a seguir:

- Comparar as características dos agregados naturais e das escórias de aciaria em diferentes níveis de expansão, para inferir sobre possíveis efeitos destes materiais quando utilizados como agregados para pavimentação, através da realização de ensaios de caracterização convencionais e ensaios químicos e morfológicos;
- Avaliar os possíveis efeitos da expansão de escórias de aciaria LD no desempenho a longo prazo de misturas asfálticas produzidas com 100% de agregado natural (AN), e com substituição de 25% do AN por coproduto de aciaria LD em três níveis distintos de expansão, utilizando diferentes métodos de envelhecimento, i.e., em corpos de prova compactados e envelhecidos naturalmente nos períodos de 0, 3, 6 e 12 meses, e em laboratório tanto de misturas soltas quanto de corpos de prova compactados envelhecidos em estufa;
- Avaliar os efeitos da expansão de escórias na resistência à tração das misturas asfálticas estudadas envelhecidas a curto prazo e longo prazo, através da realização de ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD);
- Avaliar os efeitos do calor e umidade na resistência das misturas asfálticas estudadas envelhecidas, através da realização de ensaios de Dano por Umidade Induzida – DUI, conforme (AASHTO T-283) variando o número de ciclos de gelo-degelo (1 e 5 ciclos);

- Avaliar a eficiência do CAP de encapsular os efeitos expansivos da escória a longo prazo, através da realização do ensaio de PTM 130/78 em amostras de agregados extraídos de misturas asfálticas após serem submetidas a processos de envelhecimento em laboratório.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho foi organizado da seguinte forma:

O primeiro capítulo compreende de uma introdução ao tema, o problema de pesquisa, e os objetivos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre como o envelhecimento da mistura asfáltica influencia na degradação da camada de revestimento asfáltico. Ainda nesse capítulo, é exemplificado a quantidade de coprodutos gerados pelas indústrias de fabricação do aço, como esses coprodutos são gerados em determinada etapa da fabricação do aço, e como as características dos coprodutos são diferentes à medida que o processo utilizado pela empresa se altera.

O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para realizar as caracterizações e obtenção de resultados.

O quarto capítulo apresenta os resultados e suas respectivas conclusões, assim como, uma análise estatística de alguns resultados encontrados.

O quinto capítulo apresenta as conclusões da pesquisa e sugestões de futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre os mecanismos de envelhecimento do revestimento asfáltico, os principais métodos de envelhecimento empregados em diversas pesquisas nacionais e internacionais, bem como uma revisão sobre a escória LD, sua geração, importância da siderurgia nacional, os mecanismos de expansão e uso da escória na pavimentação.

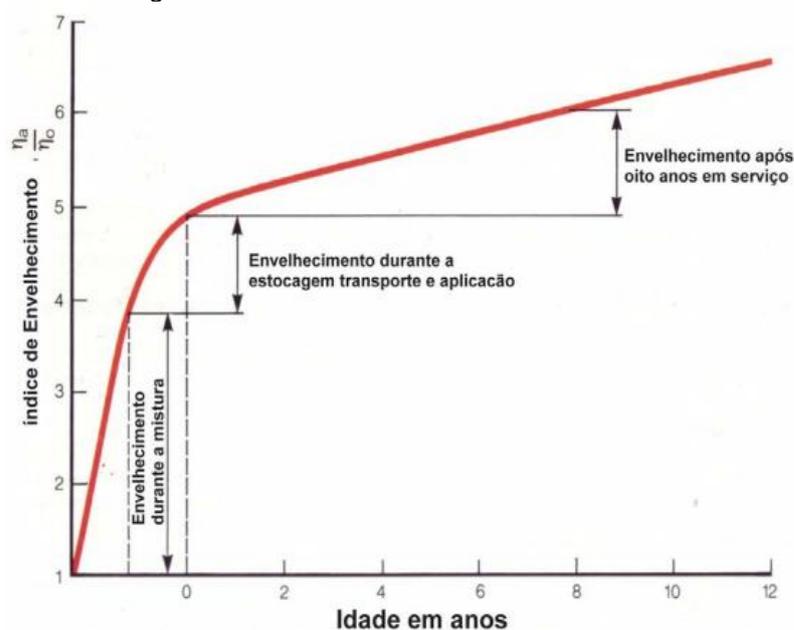
2.1 PROCESSO DE ENVELHECIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Estudos do envelhecimento do CAP e misturas asfálticas são de grande importância e vêm sendo realizado por diversos autores no mundo. O envelhecimento do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), é uma ação natural causada, geralmente, por reações de oxidação do material com o oxigênio do ar. O CAP oxidado, exibe uma maior viscosidade, quando comparado ao CAP não oxidado. Isso se deve, pois, o CAP é uma solução coloidal balanceada pelo arranjo de suas moléculas, que sofrem alterações nesse processo, com as resinas se transformando em asfaltenos e os aromáticos se transformando em resinas. O acréscimo da quantidade de asfaltenos propicia o aumento da rigidez do CAP, sendo este o principal indicador de envelhecimento. Como consequência do envelhecimento do CAP, têm-se o envelhecimento global de misturas asfálticas.

O envelhecimento das misturas asfálticas ocorre em três etapas principais, conforme Figura 1: a primeira etapa, refere-se à mistura asfáltica em usina, devido ao aquecimento do CAP e processo de mistura destes aos agregados; a segunda etapa, ocorre no transporte e na compactação da mistura asfáltica, devido ao ligante asfáltico estar exposto a altas temperaturas e apresentar maior superfície em contato com oxigênio; e a terceira etapa, acontece durante a vida útil do pavimento, onde geralmente a temperatura não ultrapassa 60-70°C no interior do revestimento, porém continua envelhecendo devido às condições climáticas e, indiretamente, a constante solitação do tráfego de veículos; ARAÚJO, (2007); MORILHA, (2004). Estudos apresentam que o aumento da rigidez das misturas asfálticas acontece com maior intensidade nas duas primeiras etapas, que pode ser observado pela maior inclinação do gráfico na Figura 1. O envelhecimento que ocorre na terceira etapa,

durante a vida útil do pavimento, é causado basicamente, pelo intemperismo e pelo tráfego. O intemperismo altera as características iniciais do CAP, deixando-o com maior viscosidade e rígido com o decorrer do tempo, e conseqüentemente, alteram o comportamento mecânico das misturas asfálticas.

Figura 1 - Envelhecimento da mistura asfáltica



Fonte: Morilha (2004)

Numa tentativa de prever o desempenho de misturas a longo prazo em laboratório, misturas asfálticas têm sido submetidas a processos de envelhecimento acelerados por exposição aos raios ultravioletas (UV) em câmaras de envelhecimento e também por aquecimentos das misturas asfálticas soltas ou compactas em estufas. Outro método de envelhecimento, é ao ar livre de forma natural, porém, este método demanda um tempo muito maior que os demais citados. Algumas razões podem interferir no processo de envelhecimento das misturas asfálticas: o agregado utilizado interfere no envelhecimento oriundo do endurecimento exsudativo, perda de parte oleosa do CAP para o agregado, por causa da porosidade do mesmo; o percentual de volume de vazios da mistura; e a espessura da película de CAP, entre outros fatores (ARAÚJO, 2007).

Oliveira (2014), menciona que em algumas pesquisas o processo utilizado para envelhecimento de misturas asfálticas em laboratório, é o envelhecimento da mistura asfáltica solta, pois acredita-se que a oxidação, o aquecimento e os raios UV não

causam os efeitos de forma homogênea dentro de um corpo de prova (CP), com o envelhecimento da mistura solta, a mistura asfáltica apresenta um envelhecimento homogêneo, sendo assim, melhor representado para simular o envelhecimento das misturas asfálticas. O envelhecimento em laboratório de misturas asfálticas soltas não compactadas, também foi utilizado por outros autores como: Arega, Bhasin e De Kesel, 2013; Mollenhauer e Mouillet, 2011; Partl et al., 2012; Reed, 2010; Van den Bergh, 2011, (ELWARDANY, 2017). Segundo os estudos acima mencionado, a distorção da geometria não é uma preocupação quando se adota o envelhecimento da mistura solta, porque os corpos de provas são compactados após o envelhecimento. Além disso, os gradientes de envelhecimento não são um problema, porque a mistura solta é envelhecida como uma única camada de partículas agregadas revestidas e, assim, o oxigênio e o calor podem circular facilmente por toda a mistura. Além disso, acredita-se que a área superficial aumentada do filme aglutinante que é exposto ao oxigênio acelera o envelhecimento em misturas soltas em comparação com as amostras compactadas. Entretanto, concluiu-se após uma análise por tomografia de raios X, que as amostras após o envelhecimento a longo prazo tinham uma estrutura interna semelhante em comparação com as amostras compactadas após o envelhecimento a curto prazo, não sendo possível verificar a diferença dos métodos de envelhecimento na sua estrutura interna.

No entanto, a compactação de uma mistura solta envelhecida para testes de desempenho pode levar a uma preocupação potencial de integridade da amostra, porque o ligante envelhecido é muito rígido e, portanto, espera-se que seja menos compatível do que o material não envelhecido. Por exemplo, um estudo sobre uma mistura de graduação aberta com uso de asfalto borracha, indicou que é necessário um esforço significativamente maior para compactar uma mistura solta envelhecida de longo prazo, do que uma mistura solta de curto prazo (REED, 2010). É importante ressaltar, que um OGFC representa um caso extremo com asfalto modificado por borracha e filme de asfalto relativamente espesso. Verificou-se também, que o aumento da energia de compactação que é necessário para atingir os parâmetros volumétricos, tais como, o volume de vazios quando se usam misturas soltas envelhecidas compactadas, podem causar degradação na estrutura

agregada e alterar as propriedades da mistura (GATCHALIAN, MASAD, CHOWDHURY e LITTLE, 2006).

Existe a necessidade de avaliar o envelhecimento em misturas compactadas, pois se assemelham mais com a prática dos pavimentos asfálticos. Nos corpos de prova compactados, será possível realizar os ensaios de desempenho para análise futuras, dessa forma, exemplificando como foi o comportamento das amostras compactadas com o envelhecimento.

A Tabela 1, apresenta alguns métodos utilizados por alguns autores para simular o envelhecimento de misturas asfálticas compactadas (AIREY, 2003).

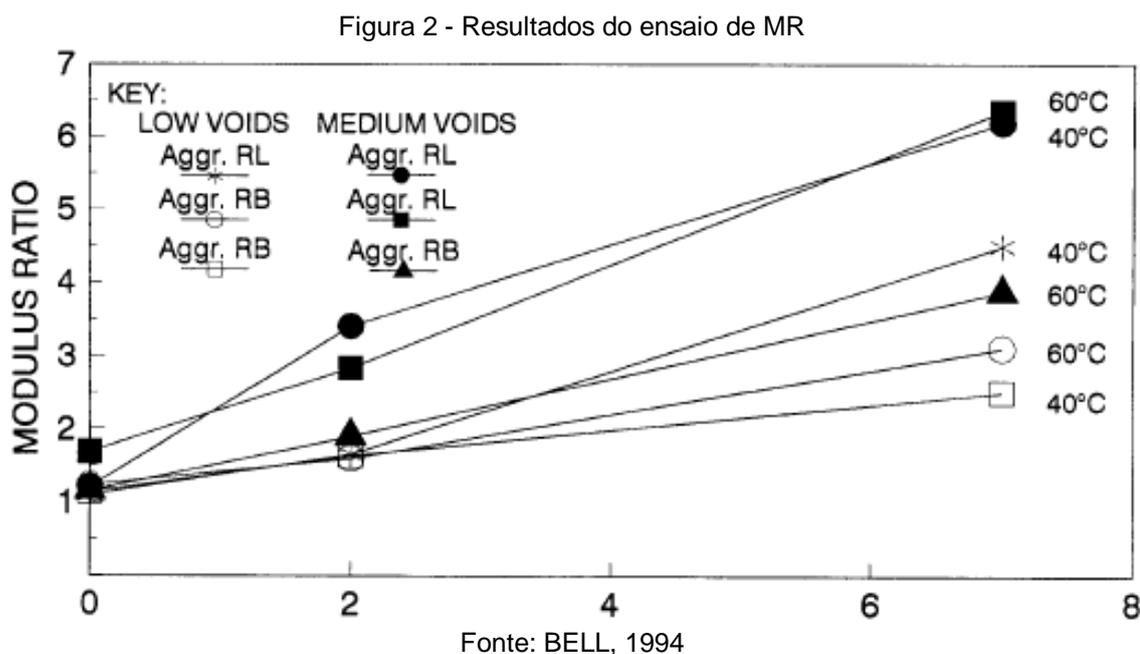
Tabela 1 - Simulação de Envelhecimento do CAP em Laboratório

	Temperatura (°C)	Duração
Long-Term Ageing (Von Quintas, 1988)	60	5 a 10 dias
Ottawa Sand Mixtures (Pauls e Welborn, 1952)	163	Vários períodos
Oregon Mixtures (Kim et al., 1986)	60	0, 1, 2, 3, 4 e 5 dias
PAV mixtures (Korsgaard, 1996)	100	72h

Fonte: Airey (2003).

Bell et al. (1994), realizou uma pesquisa para avaliar os efeitos do envelhecimento no desempenho de misturas asfálticas. Os autores utilizaram dois tipos de agregados e dois tipos de CAP. As misturas asfálticas foram compactadas de forma a resultar em dois volumes de vazios diferentes (4% e 8%), variando a energia de compactação, e envelhecidas a curto e longo prazo em estufa. O envelhecimento a curto prazo em estufa, foi feito para simular a usinagem e a aplicação das misturas asfálticas, e teve a duração de quatro horas a 135 °C. Para simular o envelhecimento a longo prazo (até três anos), a mistura asfáltica compactada ficou 5 dias na estufa a 85 °C. Logo após o envelhecimento, realizou-se os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e foi possível observar para determinadas misturas asfálticas o envelhecimento a longo prazo, que resultou em um acréscimo de até

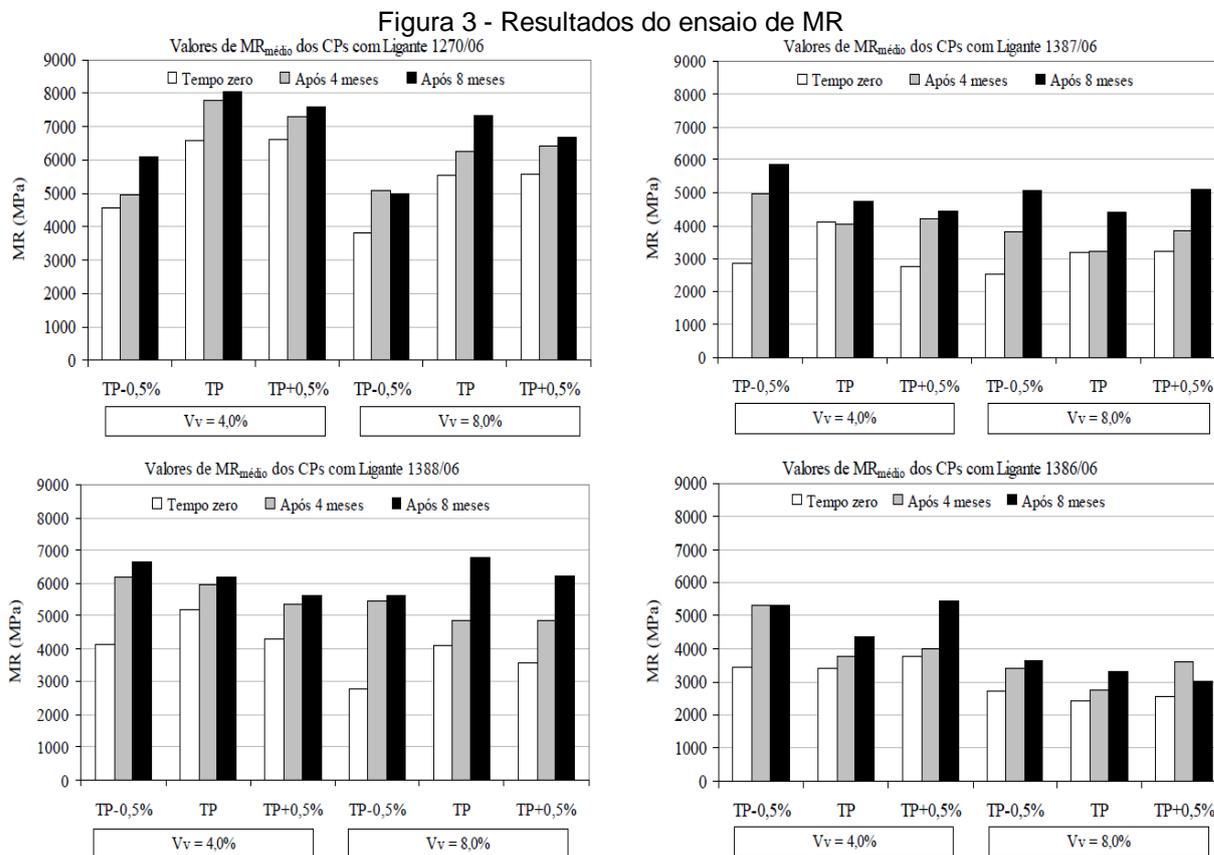
300% do valor de MR, se comparados com as misturas sem envelhecimento. A Figura 2, apresenta os resultados encontrados conforme essa pesquisa a análise do envelhecimento apenas do CAP e não é capaz de prever a ação no comportamento da mistura asfáltica, de forma que os agregados também influenciam no envelhecimento da mistura.



Também é possível encontrar na literatura envelhecimento de misturas asfálticas compactadas e envelhecidas ao ar livre. Leite (2010), simulou o envelhecimento por intemperismo sem a influência do tráfego. Na pesquisa, foram moldadas placas de misturas asfálticas com dois percentuais de volume de vazios diferentes (4% e 8%). Para o estudo, o CAP foi extraído das placas nos períodos de zero, quatro e oito meses após serem envelhecidas ao ar livre. O envelhecimento em campo do CAP depois de quatro meses, para os dois volumes de vazios estudados, se mostrou acentuado. Mesmo não sofrendo o envelhecimento a curto prazo em laboratório, as misturas asfálticas sofreram enrijecimento maior das que ocorreram após o envelhecimento no simulador RTFOT (Rolling Thin-Film Oven Test). De maneira geral, as amostras após RTFOT se tornaram mais elásticas e dessa forma, mais resistentes às deformações permanentes a altas temperaturas. Os valores de módulo de resiliência e de consistência do CAP não apresentaram uma alteração de

valores considerável da mistura asfáltica em comparação ao maior ou menor teor de CAP e de vazios estudados, conforme demonstrado na Figura 3.

A Figura 3, apresenta a variação do módulo de resiliência com teor de ligante e volume de vazios nos tempos zero, após quatro e oito meses para cada tipo de ligante. No tempo zero e após quatro e oito meses de exposição, as misturas nem sempre se comportaram conforme a expectativa. Segundo o autor, os corpos-de-prova envelhecidos com menor teor de ligante e maior teor de vazios apresentam menor módulo. Pode-se verificar que todas as amostras, com exceção da 1386/06 com menor teor de ligante (TP-0,5%) e maior teor de vazios, apresentaram os menores valores de MR. No entanto, quando analisado no teor de projeto, TP e com 8% de vazios, pode-se verificar que as amostras 1270/06 e 1388/06, apresentaram uma variação significativa. Após oito meses, houve um ligeiro aumento de módulo em relação aos valores de quatro meses, para todas amostras com 4,0% de vazios. Vale ressaltar, que as amostras 1270/06 e 1388/06 foram as que apresentaram os maiores valores de módulo em qualquer teor se situando acima de 6000 MPa.



Fonte: Leite, 2010

Segundo Houston et al. (2005), o gradiente de envelhecimento em um corpo de prova envelhecido em laboratório, não replica o gradiente de envelhecimento em campo. No campo, o envelhecimento é maior na superfície e reduz com profundidade. No entanto, em corpos de prova envelhecidos em laboratório, o envelhecimento é maior na periferia e reduz-se para o centro do mesmo. Assim, a direção dos gradientes de envelhecimento difere entre os núcleos de campo e os compactados.

Baseado em uma revisão completa da literatura (AREGA et al., 2013; HARRIGAN, 2007; HOUSTON et al., 2005; MOLLENHAUER e MOUILLET, 2011; PARTL et al., 2012; REED, 2010), as vantagens e desvantagens do envelhecimento das amostras compactadas e envelhecimento da mistura foram compiladas e estão resumidas na Tabela 2:

Tabela 2 - Comparação entre métodos de envelhecimento

Envelhecimento de amostra compactada	Prós:	Podem produzir amostras envelhecidas para testes de desempenho se a queda (geometria distorcida) for minimizada através do uso de rede de arame, por exemplo;
	Contras:	Taxa de oxidação mais lenta que a mistura solta; A integridade dos corpos de provas é comprometida em altas temperaturas e pressões devido à distorção da geometria e rachaduras; Os gradientes de oxidação atuam radialmente e ao longo da altura do corpo de prova
Envelhecimento da mistura solta	Prós:	Envelhecimento homogêneo na mistura; Maior taxa de oxidação que a mistura compactada;
	Prós:	Manutenção da integridade da amostra não é um problema;

Dificuldades para compactação da mistura solta envelhecida, que limita o uso para produzir amostras para testes de desempenho;

Contras:

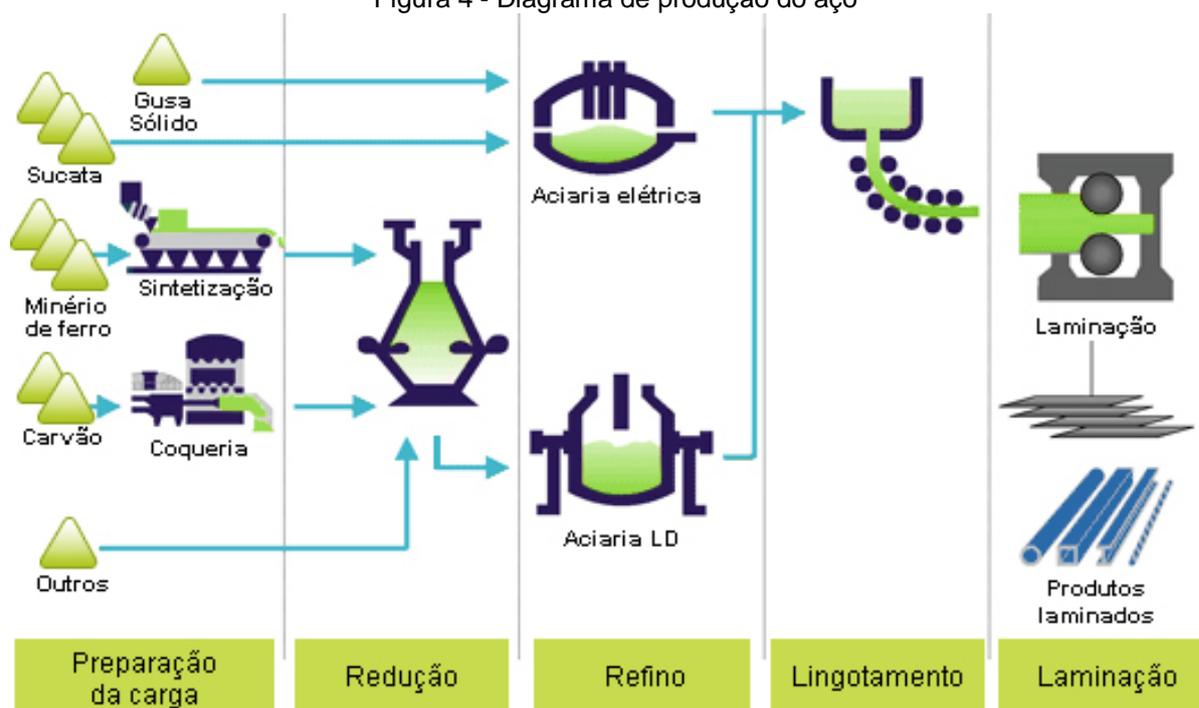
Uma quantidade limitada de materiais pode ser envelhecida em um padrão pressurizado câmara de vaso de envelhecimento (PAV).

Com a finalidade de encontrar resultados de caracterização mecânica e volumétrica que estivessem mais próximos dos resultados em campo, além do envelhecimento de misturas soltas em laboratório, também faz parte do programa experimental realizar ensaios mecânicos considerando o envelhecimento das misturas asfálticas compactadas e envelhecidas em laboratório e ao ar livre por 3, 6 e 12 meses.

2.2 INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

A produção de aço bruto no ano de 2017, foi de 34,4 milhões de toneladas, o que representou crescimento de 9,8% em comparação com o ano anterior. Em 2016, o total foi de 31,3 milhões de toneladas – nesse caso, houve queda de 6% em relação a 2015. Na produção mundial de aço, a indústria brasileira, no biênio 2016-2017, teve representatividade de 2,1%, caindo do 8º para o 9º lugar no ranking liderado pela China. Já na América Latina, o Brasil manteve a 1ª posição na produção de aço, correspondendo a 53,5% do total da região em 2017 e 52,4% em 2016. Em 2017, os 11 grupos empresariais associados ao Instituto Aço Brasil faturaram R\$ 81,6 bilhões, 21,9% a mais do que em 2016. A Figura 4, apresenta o processo da fabricação do aço a partir de matérias primas diferentes.

Figura 4 - Diagrama de produção do aço



Fonte: Instituto Aço Brasil

Baltazar (2001), diz que o processo de transformação de ferro em aço pode ser dividido em três etapas:

- **Redução:** É a etapa de remoção do oxigênio do ferro para juntar-se ao carbono, que acontece dentro de um alto-forno, durante o processo o ferro se liquefaz, tornando-se ferro gusa.
- **Refino:** Na forma de ferro gusa ele é levado para a aciaria para ser convertido em aço, é o processo onde o ferro gusa sofre a queima das impurezas presentes no material de adição.
- **Fabricação do aço e Laminação:** É o processo de solidificação do aço onde ele é transformado em chapas, grossas ou finas, e enrolados em bobinas conforme especificações do cliente.

Na primeira das três etapas, o alto-forno produz um coproduto denominado de escória de alto-forno. Já na segunda etapa, são produzidos os coprodutos denominados de escória de aciaria.

Conforme a constituição, o tipo de aço que se necessita produzir há, basicamente, três grandes processos de fabricação. Esses são divididos pelo processo de refino: LD (Linz-Donawitz) ou BOF (*Blast Oxygen Furnace*) que utiliza o conversor a

oxigênio, elétrico ou EAF (*Electric Arc Furnace*) que utiliza o Forno de Arco Elétrico (FAE) e OH (*Open Heart*) que utiliza o forno Siemens-Martin (MACHADO, 2000).

No Conversor a Oxigênio (BOF), o oxigênio é soprado no vaso do forno por um jato de oxigênio refrigerado a água, dessa forma, oxidando o carbono e outros elementos indesejados no ferro fundido. (IBS, 2016).

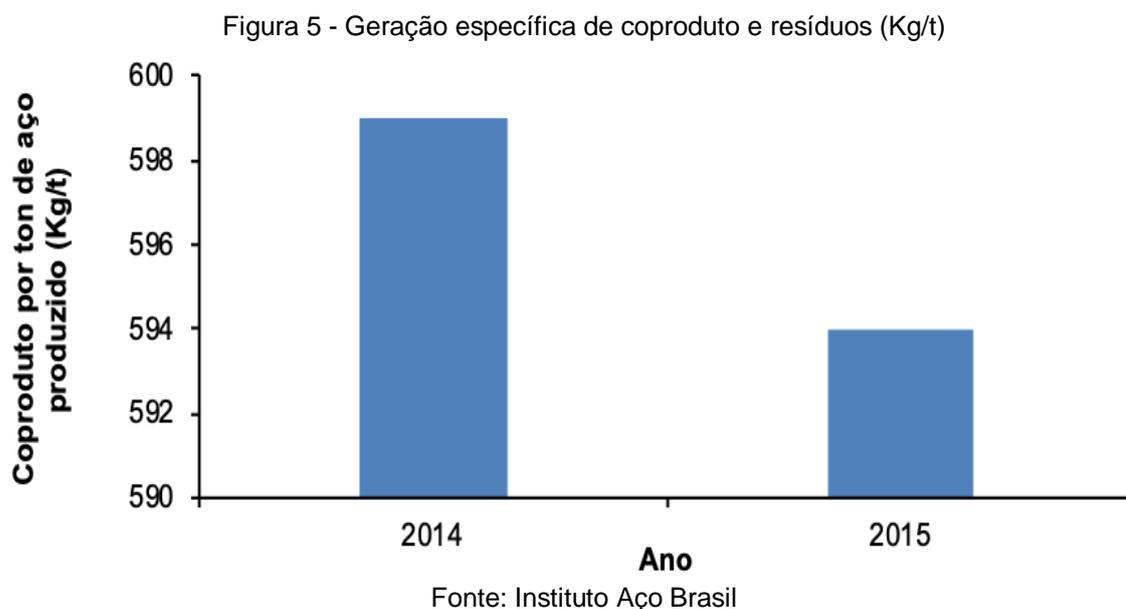
Durante o processo siderúrgico, juntamente com o aço, são produzidos coprodutos e resíduos para os quais foram criadas tecnologias que aceitam sua utilização, de forma ambientalmente adequada, como fonte de energia na própria atividade geradora, matéria-prima ou por terceiros. Os principais coprodutos e resíduos gerados, são escória de alto-forno e aciaria, pós e lamas oriundos de sistemas de controle atmosférico (NSA, 2013).

As escórias são essenciais para o refino do aço, porque são responsáveis pela absorção das inclusões não metálicas produzidas durante a fabricação do aço, de maneira a aperfeiçoar as propriedades mecânicas desejadas para cada tipo de aço. A escória influencia diretamente a temperatura do banho, a taxa de desfosforação, consumo de refratários, consumo de energia, rendimento metálico, entre outros (ASTH, 2011; VAZ, 2001).

Nesta pesquisa, será avaliado o uso de escória LD em misturas asfálticas envelhecidas a curto e longo prazo.

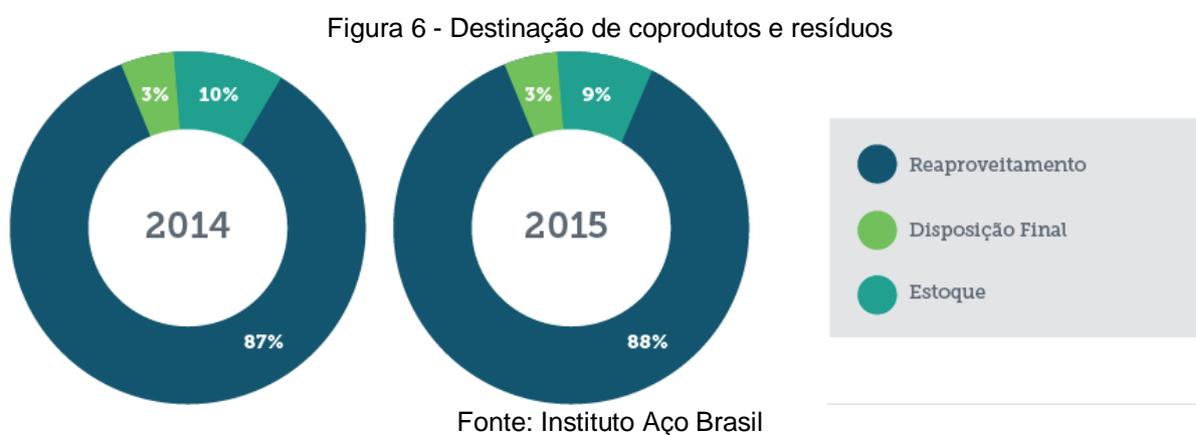
2.3 COPRODUTOS E RESÍDUOS

Segundo o relatório de sustentabilidade IABR (2018), os coprodutos siderúrgicos são materiais que são originados do processo de fabricação do aço. Já existem tecnologias que permitem sua utilização de maneira ambientalmente adequada, como matéria-prima ou fonte de energia nas próprias atividades geradoras ou por terceiros. Porém, apesar de existir demanda, ainda assim grande parte fica sem uso ou destinação, principalmente do coproduto de aciaria LD. Na Figura 5, é mostrado a quantidade de coprodutos e resíduos gerados em quilogramas na fabricação de uma tonelada de aço bruto.



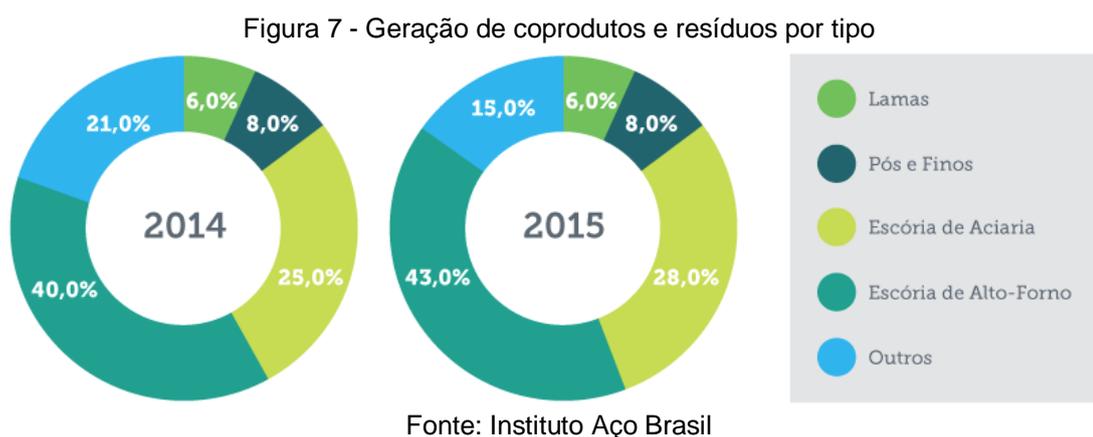
A destinação destes coprodutos e resíduos é de grande importância ambiental, visto que, segundo o relatório de sustentabilidade apresentado pelo Centro de Coprodutos Aço Brasil em 2016, a geração total de coprodutos e resíduos diretos em 2015 foi de 19,8 milhões de toneladas.

Na Figura 6, é mostrado a destinação do coproduto e resíduos produzidos nos anos de 2014 e 2015.



Apesar de apenas 3% dos coprodutos e resíduos terem como fim à disposição final, a quantidade de resíduos gerados é muito grande, visto a quantidade produzida.

A Figura 7, observa-se a porcentagem de cada tipo de resíduo gerado na fabricação do aço.

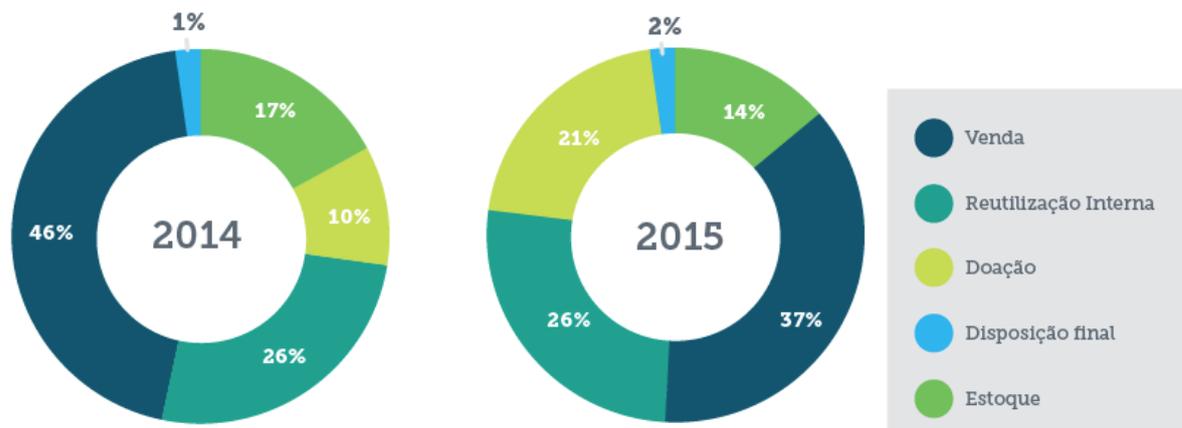


É notório observar, que os dois resíduos mais produzidos durante a fabricação do aço, são a escória de aciaria e a escória de alto-forno. A escória de alto-forno, é em sua grande maioria vendida, como é mostrado na Figura 8, principalmente, para as indústrias fabricantes de cimentos.



A Figura 9, apresenta a destinação das escórias de aciaria e outras escórias.

Figura 9 - Destinação das escórias de aciaria e outras escórias 2014/2015



Fonte: Instituto Aço Brasil.

2.3.1 Escória de Aciaria LD

A escória de aciaria, é produzida na etapa de conversão do ferro líquido em aço. Essa transformação ocorre pela adição de fundentes que são oxidadas as impurezas, tais como, silício, fósforo e enxofre, e tem a função de reter essas impurezas presentes no aço.

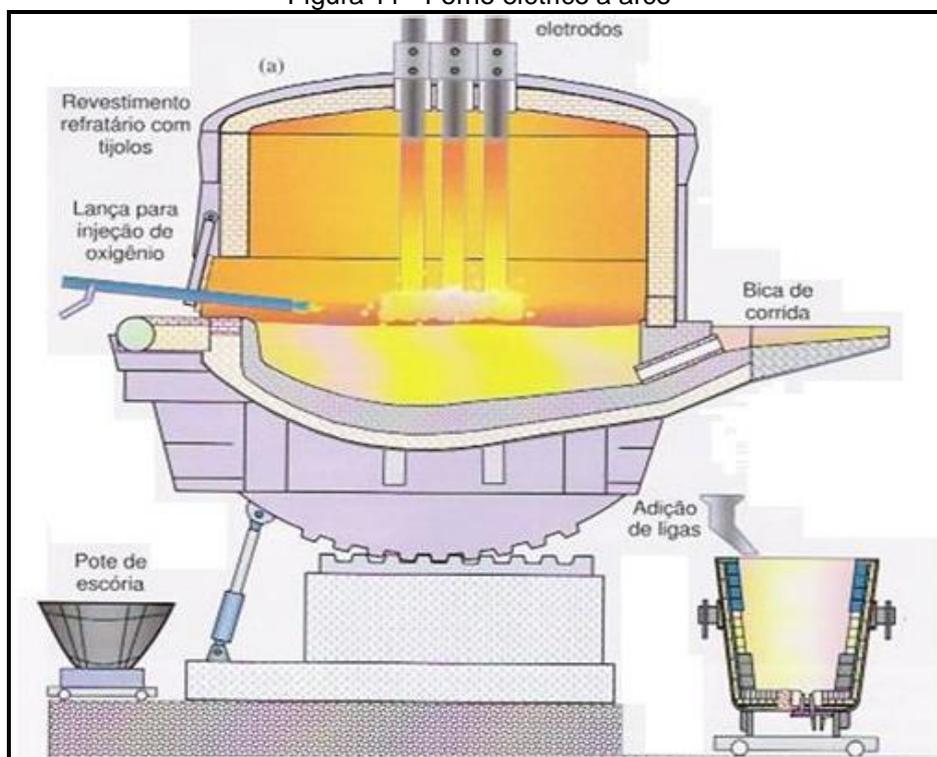
Para a etapa do refino, a transformação do ferro gusa em aço pode ser feita de duas maneiras diferentes a depender do tipo de aciaria. A mais comum é o processo LD, que é realizado no convertedor “Linz e Donawitz” LD, mostrado na Figura 10. Essa denominação é oriunda das iniciais de duas cidades austríacas “Linz” e “Donawitz”, onde surgiram as primeiras experiências sobre esse processo, em 1949 (Gonçalves, 2005). O segundo processo e menos comum, é o de aciaria elétrica que utiliza fornos elétricos para transformação de sucata em aço exemplificado na Figura 11 (BALTAZAR, 2001).

Figura 10 - Carregamento do Convertedor LD



Fonte: Lobato (2014).

Figura 11 - Forno elétrico a arco



Fonte: Lobato (2014).

A maioria das escórias do tipo LD, são compostas por ferro, silício e cálcio, apresentando uma quantidade de cal livre significativa, uma característica volumétrica instável e indicam uma expansividade maior que as escórias de forno elétrico.

Gonçalves (2016) descreve, que a formação das escórias de aciaria tem início no sopro do oxigênio, assim como, recebe na fase inicial do refino, onde são formados os óxidos de ferro e silício. Conforme o refino é realizado, é acrescentado cálcio à mistura, aumentando os teores de óxido de cálcio.

O tipo de cal utilizada no processo, virgem ou dolomita, é um dos fatores responsáveis pela escória LD. Apresentam composição química variável, sendo que, a escória produzida com a utilização de cal dolomítica aponta maior teor de óxido de magnésio. Devido essa variação da composição química, Rodrigues (2007), apresenta a Tabela 3 com a variação desta composição encontrada por diversos autores.

Tabela 3 - Composição química das escórias de aciaria de acordo com alguns estudos

Estudo	Composição química (%)							
	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Fe Total	S	P ₂ O ₅
MURPHY et al., 1997	35	11,5	3,6	18	6,5	-	-	-
MOTZ; GEISELER, 2001	45 - 55	< 3	< 3	12 - 18	< 5	18	-	< 2
GEISELER, 1999	48 - 54	1 - 4	1 - 4	11 - 18	1 - 4	14 - 19	-	-
NSA, s.d.	42	8	5	15	5	24	0,08	0,8
GEORGE; SORRENTINO, 1980	47	6	1	13	5	25	< 0,1	2
FILEV, 2002	44,3	6,4	1,5	13,8	5,3	17,5	0,07	-
LITTLE; SETEPLA, 1999	36 - 46	5,5 - 12,5	0,8 - 4	11 - 15,5	-	14 - 22	-	-
	40 - 52	5 - 10	-	10 - 19	5 - 8	10 - 40	< 0,1	0,5 - 1

Fonte: adaptado Rodrigues (2007).

2.3.2 Expansibilidade do Agregado Siderúrgico LD

Os agregados siderúrgicos, são muito utilizados na engenharia civil devido, principalmente, as suas propriedades físicas, sendo utilizados como lastros ferroviários, na construção de estacionamentos, pátios industriais, proteção de taludes, pavimentos de estradas vicinais, aterros, como material de base e sub-base de pavimentos, e na produção de revestimentos asfálticos. Porém, sem uma orientação adequada e falta de critérios técnicos adequados na aplicação desse coproduto, acontecem problemas de durabilidade e desempenho em algumas das duas utilizações.

A principal indagação que existe quanto à aplicação de escória de aciaria LD para sua utilização em obras de pavimentação e aterro, é a possibilidade de ocorrer expansão do mesmo. Suas reações expansivas impossibilitam, em princípio, a sua utilização. A expansão deste coproduto ocorre devido à presença de certos compostos da escória de aciaria, dessa forma, gerando tensões internas que resultam em trincas e até na pulverização do material. Os compostos, CaO e MgO são os mais instáveis volumetricamente, por conseguinte, os principais responsáveis pela desintegração e enfraquecimento, por alteração de volume molar nas suas reações.

O teor de cal e MgO livres, são de grande importância no que se refere a estabilidade de volume da escória de aciaria, entretanto, a expansão não é levada em consideração para revestimento primário e áreas de estacionamento. O composto cal livre, hidrata-se rapidamente e pode gerar alterações de volume ao longo de um período relativamente curto de tempo, semanas, enquanto nos hidratos de magnésio essa alteração de volume ocorre lentamente e contribui para a expansão de longo prazo, que pode levar anos para desenvolver-se (GEISELER, 1996)

Alguns fatores e mecanismos que influenciam diretamente na expansibilidade ou a estabilização da escória de aciaria estão descritos na Tabela 4. Dos fatores que interferem na expansão da escória de aciaria, pode-se ressaltar a hidratação dos CaO e MgO livres. A hidratação do óxido de cálcio livre ocorre de forma mais rápida, com grande parte da reação ocorrendo em algumas semanas, enquanto que o óxido

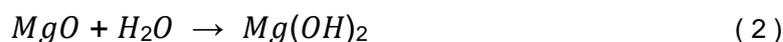
de magnésio, hidrata-se lentamente e suas variações volumétricas podem se estender por muitos anos (KANDHAL e HOFFMAN, 1997).

Tabela 4 - Fatores e mecanismos que influenciam a expansibilidade

Espécies Químicas	Parâmetros	Mecanismos
CaO e MgO	Teor da espécie no estado livre	Hidratação
	Umidade	
	Temperatura	
	Teor de CO ₂	
Tamanho dos grãos de escória		
Fe	Teor de Fe	Oxidação
	Umidade	
	Tempo de exposição ao ar	
	Teor de oxigênio no resfriamento	
Tamanho dos grãos da escória		
C ₂ S	Velocidade de resfriamento	Transformação alotrópica
	Impurezas iônicas	
	Temperaturas de resfriamento	
	Basicidade das escórias	

Fonte: MACHADO (2000)

Durante o processo de hidratação, o óxido de cálcio livre (CaO) forma o hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂), conforme a Equação (1) e o óxido de magnésio (MgO) dá origem ao hidróxido de magnésio ou brucita, Equação (2).



A cinética de reação de hidratação do MgO nas escórias de aciaria LD é lenta. Além disso, o fato do óxido de magnésio (MgO) se hidratar lentamente, gera instabilidade ao longo do tempo, que depende do tamanho dos cristais e este depende da velocidade de resfriamento. No caso de resfriamento lento, formam-se grandes cristais que se hidratam lentamente, causando elevada expansão. Já os cristais pequenos hidratam-se rapidamente e não chegam a causar pressões internas (SILVA *et al.* 2003).

Também é citada na literatura a reação de carbonatação, Equação (3), como responsável pela expansão da escória de aciaria (MACHADO, 2000; SILVA *et al.*, 2003; CASTELO BRANCO, 2004).



Nas alterações por hidratação, carbonatação ou oxidação, ocorre um considerável aumento de volume em relação às dimensões originais do cristal, conduzindo à expansão destrutiva da escória de aciaria. Na hidratação do óxido de cálcio, por exemplo, há um aumento de aproximadamente 99% em volume e do óxido de magnésio, esse aumento pode chegar até a 119,5%. O aumento volumétrico, gera expansão devido às tensões criadas pela diferença de volume molar entre o óxido e o hidróxido (MACHADO, 2000).

A quantidade de CaO não reagido, está ligada também a basicidade da escória, que é expressa pela relação CaO/SiO₂. A diminuição da basicidade facilita a diminuição dos teores dos óxidos livres, que passam a se combinar na forma de minerais estáveis. Quanto maior a relação CaO/SiO₂, maior a quantidade de silicato tricálcio formada inicialmente e, por consequência, maior a quantidade de CaO livre formado a partir da sua dissociação (PEDROSA, 2010).

O aumento da preocupação com o desenvolvimento sustentável, com o meio ambiente e com os planos de expansão de algumas empresas, incentiva as siderúrgicas a investirem cada vez mais em tratamentos das escórias de aciaria, com a intenção de minimizar os efeitos das reações expansivas de seus componentes (TAVARES, 2011).

Existem diferentes técnicas de tratamento da escória de aciaria, como a inserção de novos componentes para a redução de compostos expansivos na escória resultante, as adições na escória líquida (para estabilizar quimicamente os compostos expansivos), a granulação (para alterar a estrutura cristalina da escória de aciaria), a cura a vapor ou tratamento em autoclave (para a hidratação forçada dos compostos expansivos por esta reação) até, simplesmente, o tratamento ao tempo (exposição de intempéries). Os processos de redução da expansão das escórias de aciaria LD que são utilizados no Brasil são: ao tempo, ao tempo com molhagem e aeração

diária. Já as escórias de aciaria de alto forno (EAF), é realizado somente o tratamento ao tempo.

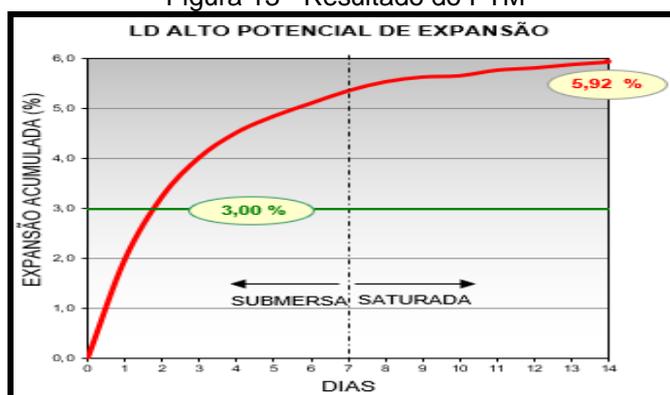
O método adotado no Brasil para avaliar o potencial de expansão da escória de aciaria, é uma adaptação feita pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais do PTM-130/78. O método descrito na norma rodoviária brasileira, DNIT-EM 262/94, especifica a utilização de escória de aciaria para pavimentos rodoviários. O ensaio consiste em moldar três corpos de prova (um no ramo seco, outro na ótima e o último no ramo úmido), que são imersos em água pré-aquecida Figura 12, à temperatura de 38°C, depois levados a estufa com ventilação interna, à temperatura de $71 \pm 3^\circ\text{C}$. Anota-se a primeira medida de expansão após 30 minutos, para que possa ocorrer a expansão térmica dos aparelhos de teste. Nos próximos 7 dias de teste, uma leitura é feita por dia. Posteriormente a água é parcialmente removida e a amostra permanece na estufa. A condição de saturação (não submersa) deve ser mantida por mais 7 dias, gerando assim um gráfico conforme Figura 13. O valor de expansão para que a escória de aciaria possa ser utilizada em camadas de pavimento, é preconizado pela norma DNER-EM 262/94, sendo o limite máximo de 3% (TAVARES, 2011).

Figura 12 – a) Material imerso em água aquecida, b) Material em estufa ventilada



Fonte: Acervo do Autor

Figura 13 - Resultado do PTM



Fonte: Acervo do Autor

2.4 ALGUNS ESTUDOS DESENVOLVIDOS SOBRE ESCÓRIA LD NA PAVIMENTAÇÃO

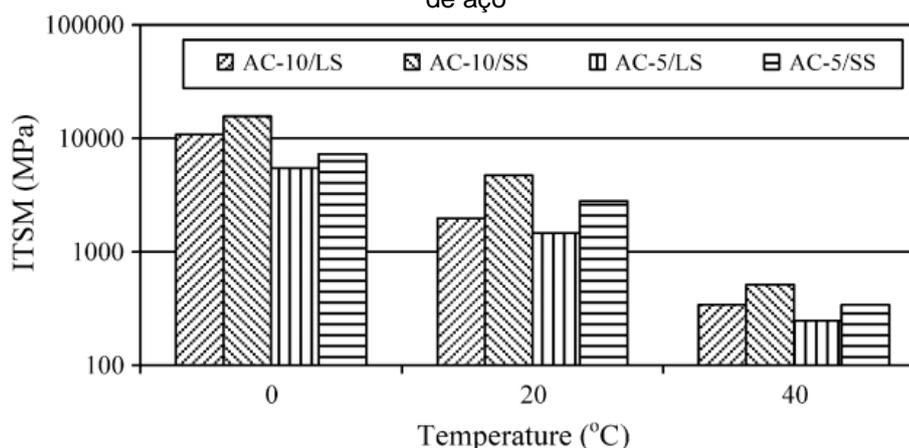
Diversos trabalhos utilizando a escória de aciaria do tipo LD na pavimentação, foram desenvolvidos ao longo do tempo. Serão apresentados os resumos de alguns trabalhos que serviram para o embasamento teórico deste estudo.

Ahmedzadea e Sengoz (2009), apresentaram as influências da utilização de escória LD como agregado graúdo nas propriedades de misturas asfálticas. Foram produzidas, quatro misturas asfálticas variando os tipos de cimento asfáltico (AC-5; AC-10) e 100% dos agregados graúdos (calcário ou escória LD). As características mecânicas de todas as misturas, foram avaliadas por meio de ensaios de estabilidade Marshall, módulo de rigidez de tração indireta, rigidez de fluência e resistência indireta à tração.

Na Figura 14, apresentada no trabalho de Ahmedzadea e Sengoz (2009), é mostrado os resultados de módulo de rigidez a 0, 20 e 40 °C para misturas de controle e com escória de aciaria. As misturas contendo escórias têm um módulo de rigidez mais alto do que as misturas de calcário em todas as temperaturas de teste, conforme indicado na Figura 15. Especialmente as melhorias significativas nos valores de módulo de rigidez de AC10/SS e AC-5/SS (misturas com agregado graúdo de escoria), são detectadas a 20 °C, que são aumentadas em 2,4 e 1,9 vezes, respectivamente, em comparação com o AC-10/LS e AC-5/LS (misturas 100% agregado calcário) misturas asfálticas. Também, entre as amostras

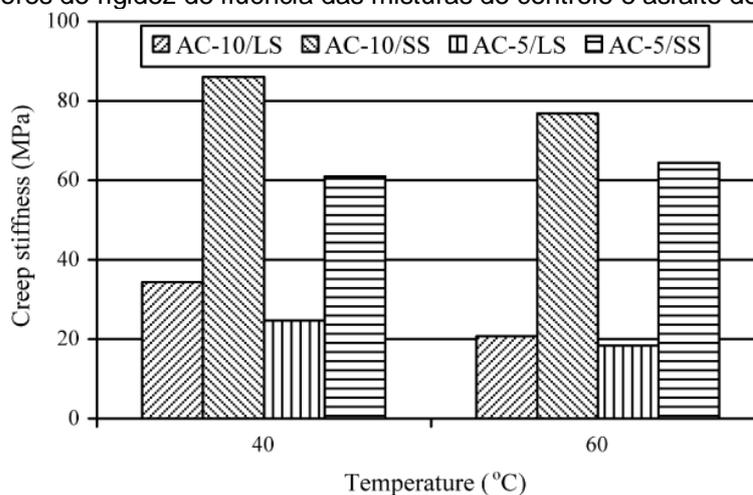
preparadas com escória de aciaria, a mistura AC-10/SS exibe valores superiores de módulo de rigidez em comparação com a mistura AC-5/SS, como é mostrado na Figura 14. Os valores dos testes de rigidez à fluência são apresentados na Figura 15.

Figura 14 - Valores Módulo de rigidez à tração indireta das misturas de controle e asfalto de escória de aço



Fonte: Ahmedzadea e Sengoz (2009)

Figura 15 - Valores de rigidez de fluência das misturas de controle e asfalto de escória de aço.



Fonte: Ahmedzadea e Sengoz (2009)

Comparado com as misturas de controle, há uma melhoria substancial na resistência à deformação permanente das misturas contendo escória de aciaria, conforme indicado pelo módulo de fluência mais alto na temperatura de teste padrão de 40 e 60 °C. Além das misturas preparadas com agregado grosso de escória de aciaria, o

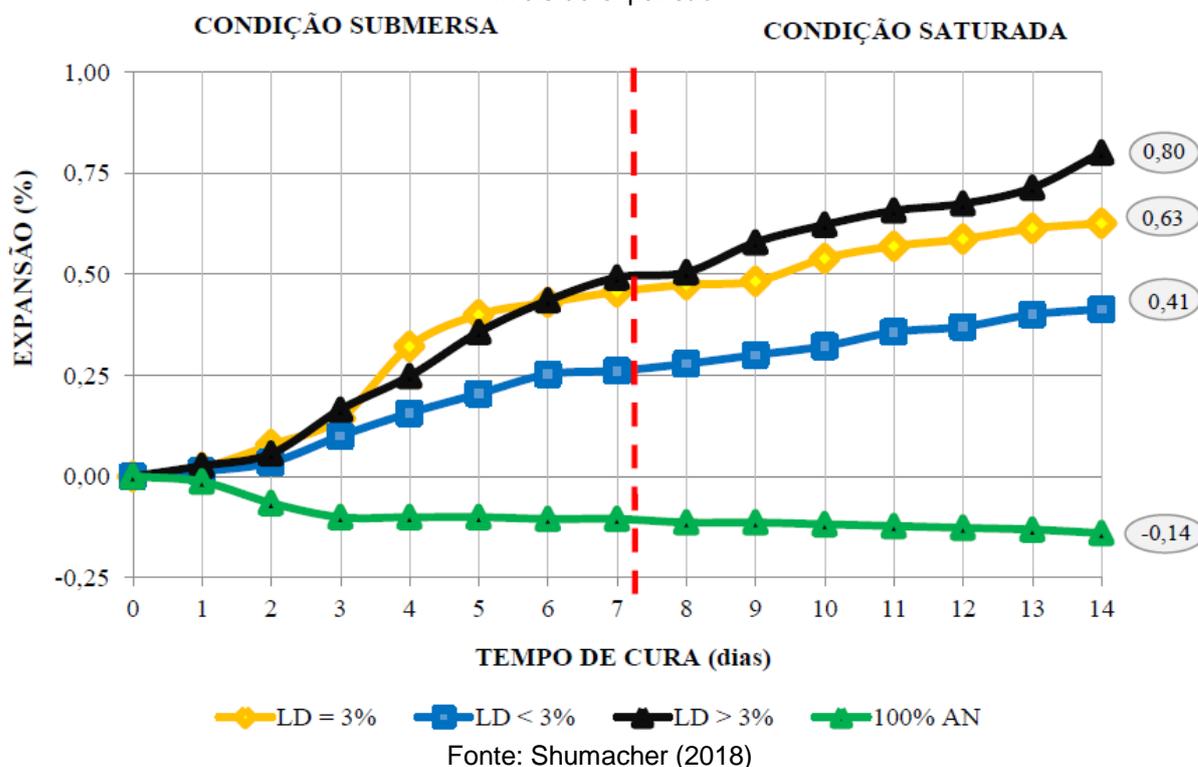
AC-10/SS produz maior valor de rigidez de fluência em comparação com a mistura AC-5/SS, conforme indicado na Figura 15.

Schumacher (2018), estudou os efeitos da expansibilidade da escória de aciaria tanto nas características físicas, químicas, mecânicas e morfológicas do material, quanto no desempenho de concretos asfálticos densos quando incorporadas como agregado em misturas asfálticas. Avaliou-se os efeitos da substituição parcial (25%) de agregados naturais por escória de aciaria LD na resistência à tração por compressão diametral, estabilidade e fluência Marshall, módulo de resiliência e adesividade das misturas asfálticas. Verificou também, se o recobrimento de agregado siderúrgico por filme de ligante betuminoso, minimiza os efeitos da expansão a curto prazo. O autor concluiu, que as características mecânicas e físicas tiveram um incremento quando o agregado natural foi substituído parcialmente por escória de aciaria. Foi observado, que a escória LD possui maior absorção que o agregado natural e esse aumento foi cada vez maior com a diminuição da expansão da escória, podendo resultar num incremento de teor de ligante para atingir os parâmetros volumétricos normatizados quando percentuais iguais ou acima de 50% de substituição que são utilizados. De um modo geral, os resultados experimentais e as análises realizadas indicam que as misturas asfálticas preparadas com escória LD, são adequadas para a construção de pavimentos asfálticos e que na maioria dos casos, apresentam desempenho tão bom ou até melhor que as misturas asfálticas preparadas com agregado natural.

Com o intuito de verificar o encapsulamento dos agregados pelo CAP, também foi realizado o ensaio de PTM modificado conforme descrito pela norma DNER – ME 049/94. Foi verificado, que as misturas asfálticas contendo agregado siderúrgico e agregado natural, apresentaram valores de expansão inferiores aos obtidos pelas amostras de agregado siderúrgico puro. Para a mistura com 25% de agregado siderúrgico com expansão de 6,71% (LD>3%), apresentou uma expansão de 0,75%. A redução nas características expansivas, também foi observada nas demais misturas. Esses resultados indicam que o aglutinante asfáltico pode ter minimizado os mecanismos de expansão do agregado siderúrgico. A Figura 16, apresenta os resultados encontrados pelo autor. Ressalta-se, no entanto, que os ensaios foram

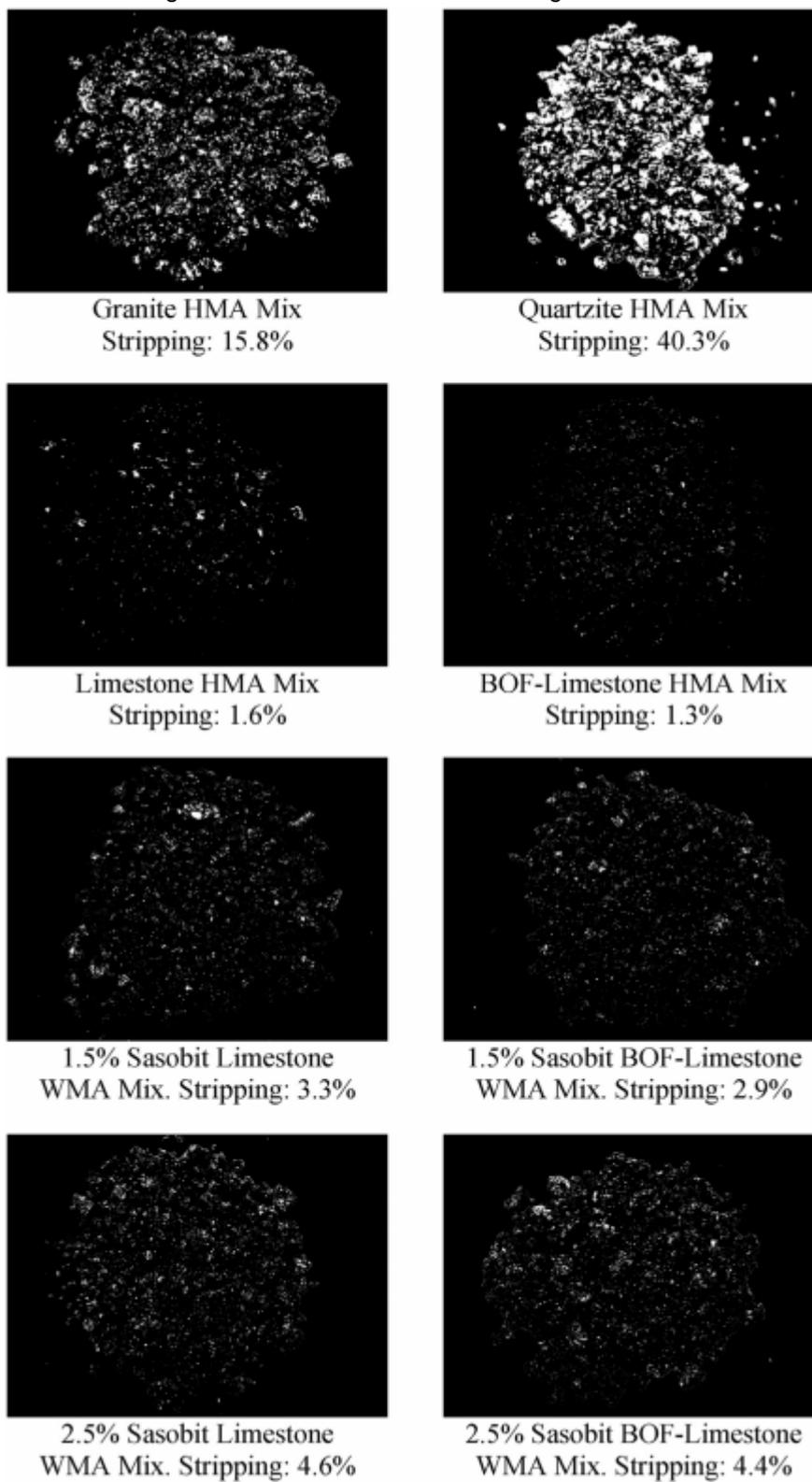
realizados em misturas não envelhecidas. O efeito da expansão no desempenho a longo prazo, precisa de mais estudos para uma avaliação completa do material.

Figura 16 - PTM Modificado realizado com as misturas CAUQ_25%LD e CAUQ_100% AN em três níveis de expansão



Amelian (2018), avaliou o comportamento da escória de aciaria do tipo BOF em sua fração grossa, expansão não especificada pelos autores, indicando um desempenho satisfatório em termos de suscetibilidade à umidade. Para a obtenção da resistência a danos por umidade à curto prazo da escória BOF, as amostras preparadas foram submetidas a dois métodos diferentes. Teste de Lottman, modificado e teste de água em ebulição, usando uma técnica de análise de imagem para comparar a suscetibilidade à umidade e ao descolamento de amostras de escórias BOF. A Figura 17, indica os resultados do método de análise de imagem, bem como, a porcentagem média de remoção de três repetições para cada tipo de mistura. A proporção de remoção de cada amostra foi determinada dividindo a quantidade de superfície removida pela quantidade total de superfície da amostra.

Figura 17 - Resultados do teste de água fervente



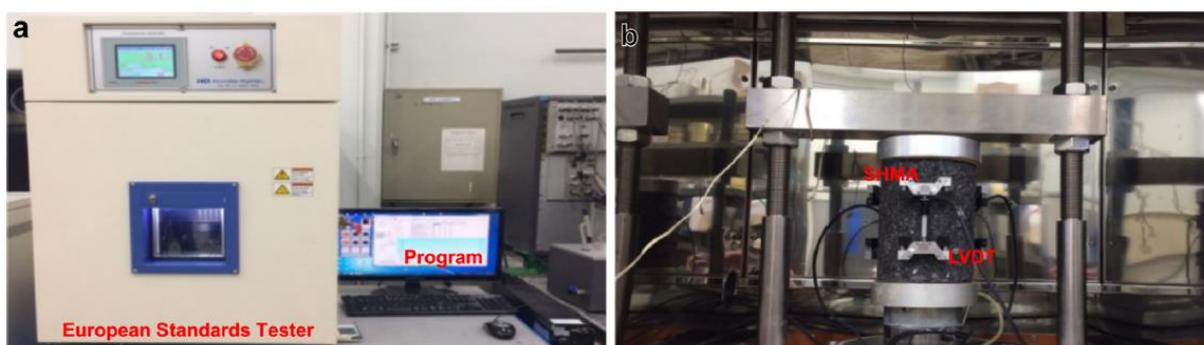
Fonte: Amelian (2018)

Com base nos resultados, Amelian (2018), verificou que as misturas produzidas usando agregados de quartzito com porcentagem de descolamento de 40,3% exibiu um potencial substancial de descolamento seguido de 15,8% de porcentagem de descolamento para a mistura de granito. No entanto, mistura de calcário e mistura de escória e calcário BOF, com porcentagens de 1,6% e 1,3% respectivamente, apresentaram menor tendência para a remoção, implicando uma sensibilidade muito baixa à água. No caso de misturas asfálticas mornas (WMA), a porcentagem de descolamento é inferior a 5% para as misturas de calcário e de escória BOF com diferentes dosagens de Sasobit. De acordo com as diretrizes do Texas DOT (O'Connor, 1984), se a quantidade de superfície agregada não revestida for menor que 10%, a amostra poderá ser classificada como altamente resistente à descolagem devido à umidade; como resultado, pode-se concluir que, apesar do ligeiro aumento na porcentagem de descolamento devido à adição de Sasobit, a combinação de agregados de escória de aço e calcário BOF demonstrou resistência significativa à decapagem nas misturas WMA, onde a quantidade de decapagem na mistura WMA de escória BOF contendo Sasobit 2,5% foi de apenas 4,4%. Esse valor, ainda é consideravelmente menor que 10% do limite.

Kim (2018), investigou o comportamento de misturas asfálticas contendo agregado de escória de aciaria (denominada SHMA) e comparou com o desempenho de mistura asfálticas contendo agregado de granito (denominada GHMA). Amostras de SHMA e GHMA, foram compactadas em diferentes volumes de vazios (3 a 5% com incrementos de 0,5%). Foi realizado, o ensaio de módulo dinâmico seguindo o procedimento do AASHTO TP-62, utilizado o equipamento *European Standard Tester* da empresa IPC Global, mostrado na Figura 18 (a). As condições experimentais, incluíram cinco temperaturas (10, 5, 20, 40 e 54 °C) e seis frequências de carregamento (25, 10, 5, 1, 0,5 e 0,1 Hz) para cada amostra. O corpo de prova tinha formato cilíndrico, com altura de 150 mm e diâmetro de 100 mm. Os transdutores de deslocamento variável linear (LVDT) foram instalados em 120° intervalos, conforme mostrado na Figura 18 (b) e um nível de carga foi determinado para garantir micro-deformações de 50 a 75 μm . Como mostrado na Figura 19, o SHMA apresentou um módulo dinâmico mais alto que o GHMA em todas as frequências de carga. Em particular, o módulo dinâmico de SHMA foi notavelmente mais alto que o de GHMA a altas temperaturas, o que indica alta resistência à

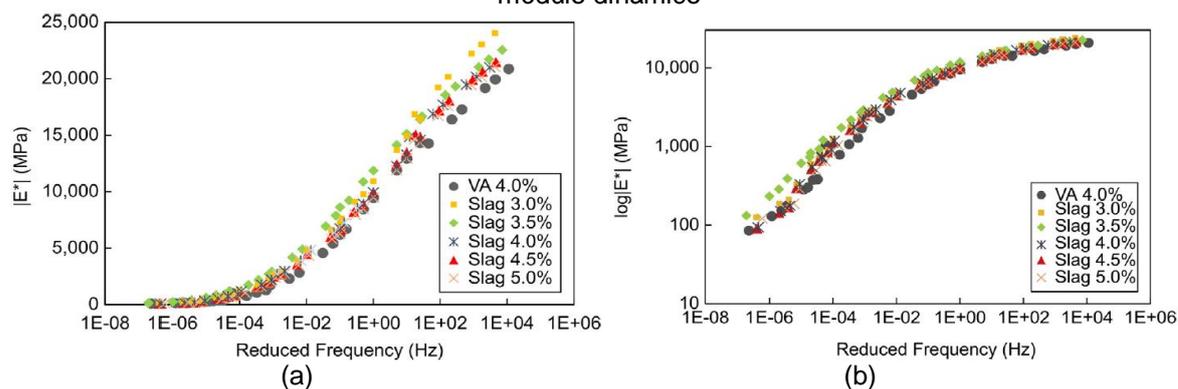
deformação permanente da SHMA. O módulo dinâmico da mistura com agregado de escória de aciaria, foi maior que os de misturas com agregado de granito. Os autores atribuíram este resultado a alta resistência e forma de grãos das escórias. Além disso, quando o volume de vazios foi aumentado para 4,5%, a escória de aciaria mostrou melhorias na resistência à deformação, resistência à tração e tenacidade de 121, 110 e 114%, respectivamente, em comparação com o agregado de granito.

Figura 18 - Dynamic modulus test. (a) European Standards Tester (IPC Global); (b) Amostra com LVDT



Fonte: KIM 2018

Figura 19 – Curvas mestre à temperatura de referência de 5 C do a) módulo dinâmico, b) log do módulo dinâmico



Fonte: KIM 2018

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia científica adotada para o desenvolvimento da pesquisa, apresentando os materiais (agregados, escória de aciaria LD e CAP) e os procedimentos experimentais adotados para verificação das principais características dos mesmos que podem influenciar no desempenho de concretos asfálticos. Também são apresentadas as composições das misturas asfálticas bem como a metodologia empregada para a dosagem das mesmas. Por fim, são apresentados os ensaios mecânicos e os métodos de envelhecimento utilizados para avaliar os efeitos expansivos da escória estuda no desempenho das misturas asfálticas.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Agregado Graúdo e Miúdo

Os agregados naturais de origem granítica, usualmente utilizado no estado do Espírito Santo na construção de rodovias, foram coletados na Mineradora Brasitália, localizada na Grande Vitória – ES, conforme Figura 20, sob as formas de brita 1 (B1), com dimensão máxima característica de 19,0 mm; de brita 0 (B0), com dimensão máxima característica de 12,5 mm e de pó-de-pedra (PP), com dimensão máxima característica de 4,8 mm.

Figura 20 - Pedreira Brasitália



Fonte: SCHUMACHER, 2018.

3.1.2 Escória LD

Foi utilizada nesta pesquisa a escória de aciaria do tipo LD, proveniente da produção do aço, cedida pela empresa Arcelor Mittal Tubarão, que se localiza no município de Serra – ES. O coproduto, Figura 21, foi utilizado para substituição parcial do agregado natural nas misturas asfálticas. Para avaliar o efeito da expansão do coproduto no desempenho das misturas asfálticas, foram coletadas amostras em 3 níveis de expansão diferentes. A primeira delas, com expansão acima de 3%, sem cura, na forma que a escória é gerada pela empresa. A segunda amostra, com nível de expansão de aproximadamente 3%, que foi submetida a um processo de cura no pátio da empresa, por um período de 6 a 8 meses. A terceira amostra, com expansão menor que 3%, que foi submetida a um período longo de cura no pátio da empresa, por aproximadamente 24 meses. Estas três amostras com expansões diferentes, foram escolhidas pensando na exigência normativa do DNIT, 115/2009 – ES, que requer para a utilização da escória em pavimentação uma expansão menor que 3%. Assim, selecionou três níveis (um acima um abaixo e um próximo deste valor limite) para avaliar o efeito da expansão. O material foi coletado após procedimento de britagem interno da empresa para o desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 21 - Amostra LD



Fonte: Acervo do Autor

3.1.3 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Foi utilizado o cimento asfáltico do tipo CAP 50/70, concedido por Vila Betume proveniente da refinaria PETROBRAS/REDUC, que se localiza no município da Serra - ES. As amostras foram levadas ao laboratório e fracionadas em volumes menores (Figura 22) de forma que o aquecimento do CAP para sua utilização não fosse repetido mais que duas vezes, evitando o envelhecimento precoce. Suas principais características estão apresentadas na ficha técnica fornecida pela refinaria à empresa, conforme Tabela 5, verifica-se que as exigências das especificações deste CAP estão em conformidade com a Agência Nacional de Petróleo (ANP).

Figura 22 – Amostra de CAP fracionada



Fonte: Acervo do Autor

Tabela 5 - Características do CAP 50/70

CERTIFICADO DE ENSAIO (Cimento asfáltico 50/70)				
Características	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D5	50 a 70	55	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D36	46 min	49,8	°C
Viscosidade Brookfield à 135 °C GC-SP21 20RPM	D4402	274 min	302	cp
Viscosidade Brookfield à 150 °C GC-SP21	D4402	112 min	154	cp
Viscosidade Brookfield à 177 °C GC SP21	D4402	57 a 285	58	cp
RTFOT penetração retida	D5	55 min	56	%
RTFOT aumento do ponto de amolecimento	D36	8 max	5,4	°C
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D113	20 min	>150	cm
RTFOT Variação em % massa	D2872	-0,5 a 0,5	-0,315	%
Ductilidade a 25 GC	D113	60 min	>150	cm
Solubilidade no tricloroetileno	D2042	99,5 min	100	% massa
Ponto de fulgor	D92	235 min	314	°C
Índice de susceptibilidade térmica	X018	-1,5 a 0,7	-1	N/A
Densidade relativa a 20 / 4 °C	D70	Anotar (1)	1,01	N/A
Aquecimento à 177 °C	X215	NESP (2)	NESP	N/A

Data/horas amostragem: 03/09/18 06:00h

Nota:

- (1) Ensaio não faz parte da especificação. Informação para fins de faturamento.
 (2) NESP = Não espuma.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS

Para avaliar as principais características dos agregados naturais e siderúrgicos e verificar o atendimento aos critérios de seleção de agregados para uso em concreto asfáltico estabelecidos na DNIT 031/2006 ES, os seguintes ensaios foram realizados:

- Granulometria dos agregados DNER-ME 083/94;
- Abrasão Los Angeles – DNER-ME 035/98;
- Massa Específica, massa específica aparente e absorção – ABNT NBR 6458/2016;
- Massa unitária DNER-ME 152/95;
- Equivalente de areia DNER-ME 054/97;
- Durabilidade ao sulfato de sódio DNER – ME 089/94;
- Adesividade DNER-ME 078/94;

Além destes, foram realizados ensaios de caracterização química e mineralógica, utilizando as técnicas de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de Raio-X (DRX), respectivamente. As amostras de escórias LD também foram submetidas à avaliação do potencial de expansão utilizando o procedimento do DNIT 113/2009 – ME. A seguir, são apresentados brevemente os ensaios realizados para a caracterização das amostras estudadas.

3.2.1 Granulometria dos agregados DNER-ME 083/94

Os agregados utilizados são classificados quanto ao seu tamanho, gráudo, material com dimensões maiores que 2,00mm, miúdo, com dimensões entre 2,00mm e 0,075mm, e material de enchimento ou filer, material menor que 0,075mm (DNIT 031/2004-ES). Para a análise granulométrica, aplicou a série normal de peneiras conforme norma ABNT 7181 (Figura 23).

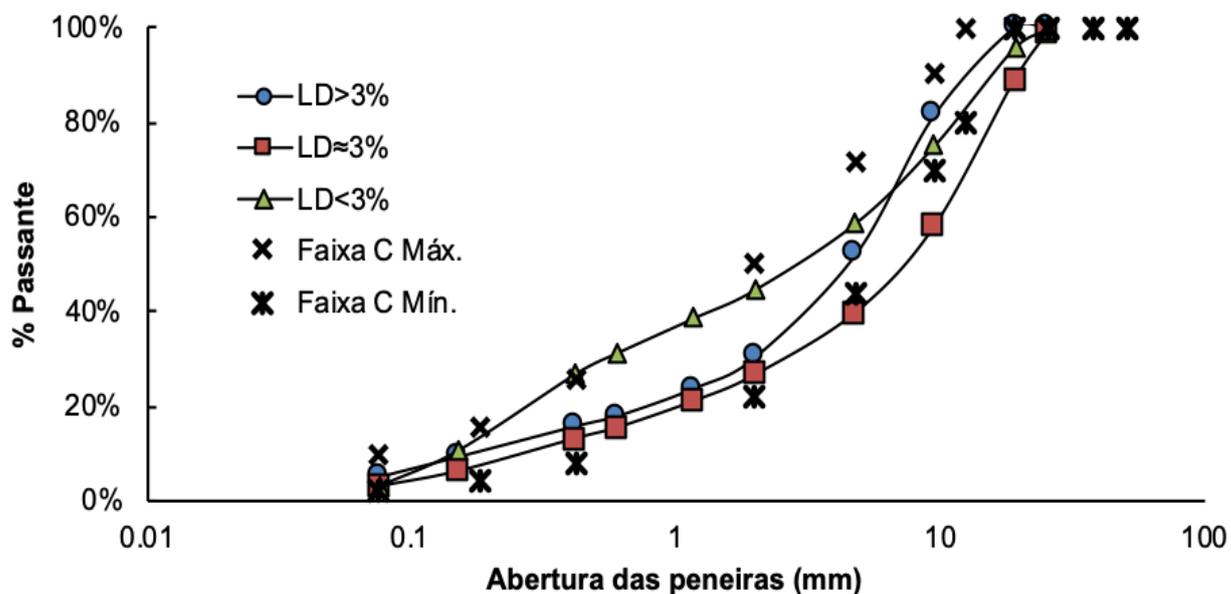
Figura 23 - Granulometria LD



Fonte: Acervo do Autor

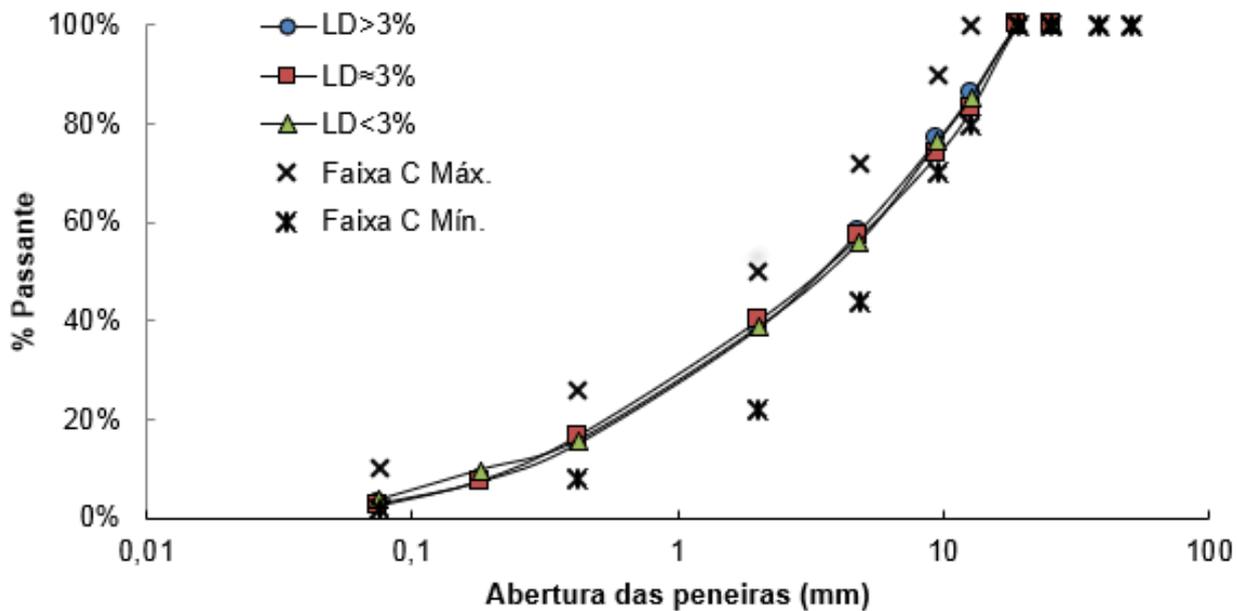
Com relação ao agregado siderúrgico, verificou-se que a distribuição granulométrica resultante variava de acordo com o nível de expansão de cada amostra, como pode ser observado na Figura 24. Com o objetivo de analisar e comparar o desempenho de misturas asfálticas com substituição parcial de agregados naturais por escória LD com base apenas na diferença do nível de expansão deste material, as três amostras com diferentes níveis de expansão foram enquadradas em uma única curva granulometria, através do fracionamento individual e composição das frações para enquadramento dentro do limite da faixa C do DNIT, como é mostrado na Figura 25.

Figura 24 - Granulometria LD quando coletada



Fonte: Acervo do Autor

Figura 25 - Granulometria LD após ser corrigida



Fonte: Acervo do Autor

3.2.2 Resistência ao Desgaste por Abrasão Los Angeles – DNER-ME 035/98

Para avaliação da resistência ao desgaste dos agregados foi realizado o ensaio de abrasão Los Angeles, conforme a norma DNER-ME 035/98. O ensaio foi realizado de acordo com a faixa B da norma, colocando-se massa total $5.000 \text{ g} \pm 10$ de agregado seco e lavado, no tambor de desgaste (Los Angeles), simultaneamente com onze esferas de aço, e submetidos a 500 revoluções à velocidade de 30 rpm a 33 rpm, para o agregado ser considerado próprio para a utilização desta pesquisa a perda deve ser menor que 50% segundo a norma do DNIT-ES 031/2006.

Os ensaios foram realizados para a amostra de agregado natural e para as três amostras de escória. Os resultados de desgaste de todas as amostras foram expressos pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malha de 1,7 mm (ABNT nº 12).

3.2.3 Massa Específica, massa específica aparente e absorção – ABNT NBR 6458/2016

Para os agregados graúdos (retidos na peneira nº 4) foi utilizada a norma ABNT NBR 6458/2016 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água e, com base nessa norma foi realizado a média de três determinações. Obtiveram-se os valores de densidade real, aparente e absorção para os agregados graúdos.

Os agregados de diâmetro entre as peneiras 4,75 mm e 0,075 mm, que compõem os agregados miúdos, têm sua densidade real determinada pela norma DNER-ME 084/95 (Agregado miúdo – determinação da densidade real), que é realizado com o emprego de picnômetro e de uma bomba à vácuo, a partir de três determinações.

3.2.4 Massa unitária DNER-ME 152/95

A massa unitária do agregado solto é a média dos resultados individuais obtidos em pelo menos três determinações, dividindo a massa do agregado pelo volume do recipiente utilizado. O volume mínimo do recipiente a ser utilizado é descrito em norma estando relacionado com a dimensão máxima dos grãos.

3.2.5 Equivalente de areia DNER-ME 054/97

O ensaio equivalente de areia (Figura 26), é realizado conforme a norma do DNER-ME 054/97, no qual avalia-se a relação volumétrica que equivale a razão entre a altura do nível superior da areia (h_1), e a altura do nível superior da suspensão argilosa (h_2) – conforme Equação (4) - de uma determinada quantidade de agregado com solução em uma proveta, de acordo com o procedimento de ensaio.

$$EA = \frac{h_1}{h_2} \times 100\% \quad (4)$$

Por normativa, o material ensaiado deve ser passante na peneira de 4,75 mm, em uma proveta com solução formada por água destilada, cloreto de cálcio, glicerina e formaldeído. O ensaio avalia a proporção de material pulverulento como argila e pó. A norma DNIT 031/2006, determina que o agregado miúdo para aplicação em pavimento tenha, no mínimo, EA igual a 55%.

Figura 26 - Ensaio de equivalente de areia



Fonte: SCHUMACHER, 2018.

3.2.6 Durabilidade ao sulfato de sódio DNER – ME 089/94

O ensaio de durabilidade dos agregados utilizados, foi realizado conforme a norma DNER – ME 089/94, Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Uma determinada massa de agregado, é imersa em solução por um período de 16 a 18 horas a temperatura, e após são drenadas e secas em estufa a 110 °C.

O ciclo foi repetido por cinco vezes em temperatura constante de aproximadamente 20 °C, e os resultados foram encontrados a partir da média de 3 determinações para cada tipo de agregado utilizado.

3.2.7 Adesividade DNER-ME 078/94

A película do ligante asfáltico da superfície do agregado, pode separar ou descolar sob a ação da água, o que torna o uso do agregado inadequado em misturas asfálticas, uma vez que pode resultar em desagregação e trincamento precoce do concreto asfáltico. Dessa forma, um dos critérios de aceitação de agregados para uso em concreto asfáltico, é a boa adesividade do agregado ao ligante.

A análise da adesividade dos agregados, foi realizada conforme a norma DNER-ME 078/94. Para a realização do ensaio adicionou-se 17,5 g de CAP 50/70 às amostras de 500 g dos agregados, passantes na peneira de 19 mm e retidos na de 12,7mm. Após o revestimento dos agregados com o CAP, as amostras foram colocadas em béqueres e foram totalmente submersas com água destilada, utilizados neste trabalho.

Figura 27, os béqueres foram colocados em estufa a 40°C por 72 horas. Após este período, foi feita uma análise visual para inferir sobre a adesividade dos agregados ao ligante CAP 50/70 utilizados neste trabalho.

Figura 27 - Ensaio de adesividade na estufa



Fonte: Acervo do autor

3.2.8 Difração de Raios-X (DRX)

A análise de difração de raios-X, é realizada para determinar as fases cristalinas dos sólidos, devido aos átomos estarem ordenados em planos cristalinos que se separam a distância de ordem de grandeza similar ao comprimento de onda de raios-X.

Para a realização do ensaio, a amostra deve ser transformada em pó e colocada sob a ação de raios-X, de maneira a interagir com os átomos da amostra, provocando dessa forma a difração dos fótons, que se relaciona com a distância entre os planos do cristal.

Em um material em que os átomos estejam arranjados (característica de uma estrutura cristalina), a distância “d” de espaçamento entre planos de uma estrutura cristalina se relaciona às relações de fase por meio da Lei de Bragg - Equação (5), GOBBO, (2003); QUEIROZ, KUROSAWA e BARRETO, (2013).

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}\theta \quad (5)$$

Em que:

n : ordem de difração;

λ : comprimento de onda aplicado;

d : distância entre planos;

θ : ângulo de incidência.

O comprimento de onda empregado e o valor de θ são sempre conhecidos. Os feixes difratados por um conjunto de planos do cristal, é apresentado em forma de picos, cuja intensidade depende dos tipos de átomos e suas posições. A análise e interpretação dos resultados, acontece por meio de um gráfico (difratograma), que correlaciona o ângulo de espalhamento 2θ e a intensidade dos picos de incidência.

O ensaio de difração de raios-X de amostras de LD utilizadas neste trabalho, foi realizado pela empresa Nanobusiness Informação e Inovação Ltda em um difratômetro de raio-X (X'Pert Pro MPD PANalytical), Figura 28, com faixa de varredura de 10 a 90° e fenda de 0,5°. Foram enviadas amostras de material passando na peneira de abertura de 0,075 milímetros. Para a realização do ensaio é colocado um pouco do material no estado pastoso sobre uma lâmina de vidro, com o auxílio de uma espátula. Com outra lâmina, friccionar o material, quantas vezes forem necessários para formar uma película fina. Posteriormente após a secagem à

temperatura ambiente, a amostra foi levada ao difratômetro para realização do ensaio.

Figura 28 - Difratômetro de raios-X



Fonte: SCHUMACHER, 2018.

3.2.9 Fluorescência de Raios-X (FRX)

O ensaio de fluorescência de raios-X (FRX), é uma análise quali-quantitativa que tem como base, as medidas das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Os raios-X excita esses elementos, os elétrons saltam e emitem uma energia (fóton) que é característica de óxidos (Nascimento, 1999).

O ensaio de FRX, foi realizado pela empresa FRX Service em um equipamento Espectrômetro de Fluorescência de Raio X WDS, da Philips, modelo PW-2404, tubo anodo de Rh. As amostras, assim como no DRX, foram secas, destorroadas e peneiradas na peneira de abertura de 0,075mm.

3.2.10 Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria LD- DNIT 113/2009 – ME.

Para a análise da expansão dos agregados siderúrgicos utilizados, foi adotado o método preconizado pela norma DNIT 113/2009 – ME, Figura 29.

Na preparação da amostra, deve-se secá-la ao ar, peneira-la na peneira de 2" (50,8mm) e desprezar a fração retida nesta peneira, realizar a curva de compactação para determinar a umidade ótima e a densidade máxima de acordo com o método DNER – ME 049/94. Posteriormente, a amostra deve ser compactada na umidade ótima em três camadas com 56 golpes cada no cilindro grande de compactação, após a compactação dos cilindros eles são colocados em um banho térmico com temperatura controlada de 71 ± 3 °C, é anotado a medida inicial do extensômetro após 30 minutos da amostra colocado no banho, as demais medidas de expansão vertical devem ser anotadas no mínimo uma vez por dia durante um período de 7 dias. Após o período de uma semana, a água do recipiente deve ser removida parcialmente e a amostra mantida na estufa a 71 ± 3 °C, porém, na condição de saturação (não submersa) por mais 7 dias, 63 com leituras conforme descrito, a porcentagem de expansão volumétrica deve ser calculada dividindo a diferença entre a leitura do extensômetro após 14 dias de condição de submersão e a leitura inicial, pela altura inicial da amostra.

Figura 29 - Ensaio de PTM



Fonte: Acervo do autor

Figura 30 - Extração de ligante



Fonte: Acervo do autor

Também foram realizados ensaios de PTM em amostras de agregados, extraídas de misturas asfálticas envelhecidas e submetidas ao DUI, com o objetivo de verificar se a expansão da mistura seria a mesma após estes procedimentos. Após o envelhecimento de diferentes métodos, foi realizado a extração do ligante das misturas asfálticas no equipamento rotarex (Figura 30), esquematizado na Figura 31. Estas amostras, foram utilizadas para realização dos ensaios de PTM. Para verificar se existe influência do solvente utilizado (querosene), e se ocorreu variação na expansão das misturas com o envelhecimento, foram realizados ensaios nas seguintes misturas

Figura 31 -Extração do CAP para ensaios de PTM



Fonte: Acervo do autor

- ✓ PTM de Mistura de Agregados **sem CAP sem extração**.
- ✓ PTM de Mistura de Agregados **sem CAP com extração (EFEITO SOLVENTE)**.
- ✓ PTM de Mistura de Agregados **extraídos** de *misturas asfálticas envelhecidas ao ar livre a longo prazo e DUI*.
- ✓ PTM de Mistura de Agregados **extraídos** de *misturas asfálticas envelhecidas em laboratório a longo prazo e DUI*.
- ✓ PTM de Mistura de Agregados **extraídos** de *misturas asfálticas envelhecidas em laboratório a curto prazo e DUI*.

3.3 MISTURAS ASFÁLTICAS

Para a produção das misturas asfálticas estudadas, deve ser definida algumas proporções entre os materiais. Neste trabalho, adotou-se as mesmas proporções empregadas em estudo preliminar a este trabalho apresentado em Schumacher (2018), uma vez que foram utilizados os mesmos agregados e proporções de materiais. Os autores adotaram a faixa C do DNIT 031/2006 - ES (DNIT, 2006), utilizando as frações dos materiais descritos na Tabela 6. Foi utilizado 25% de escória LD e 75% de agregados naturais.

Tabela 6 - Composição das misturas utilizadas

Misturas Estudadas		
Materiais	25%LD	AN
LD	25%	0%
B1	5%	10%
B0	25%	30%
Granilha	20%	25%
Pó de Pedra	25%	35%

Fonte: Acervo do Autor

O teor de ligante, foi determinado de acordo com a metodologia Marshall de dosagem, cujos procedimentos e resultados estão detalhados em Schumacher (2018). O teor ótimo encontrado foi de 5,14 %. A temperatura de mistura e

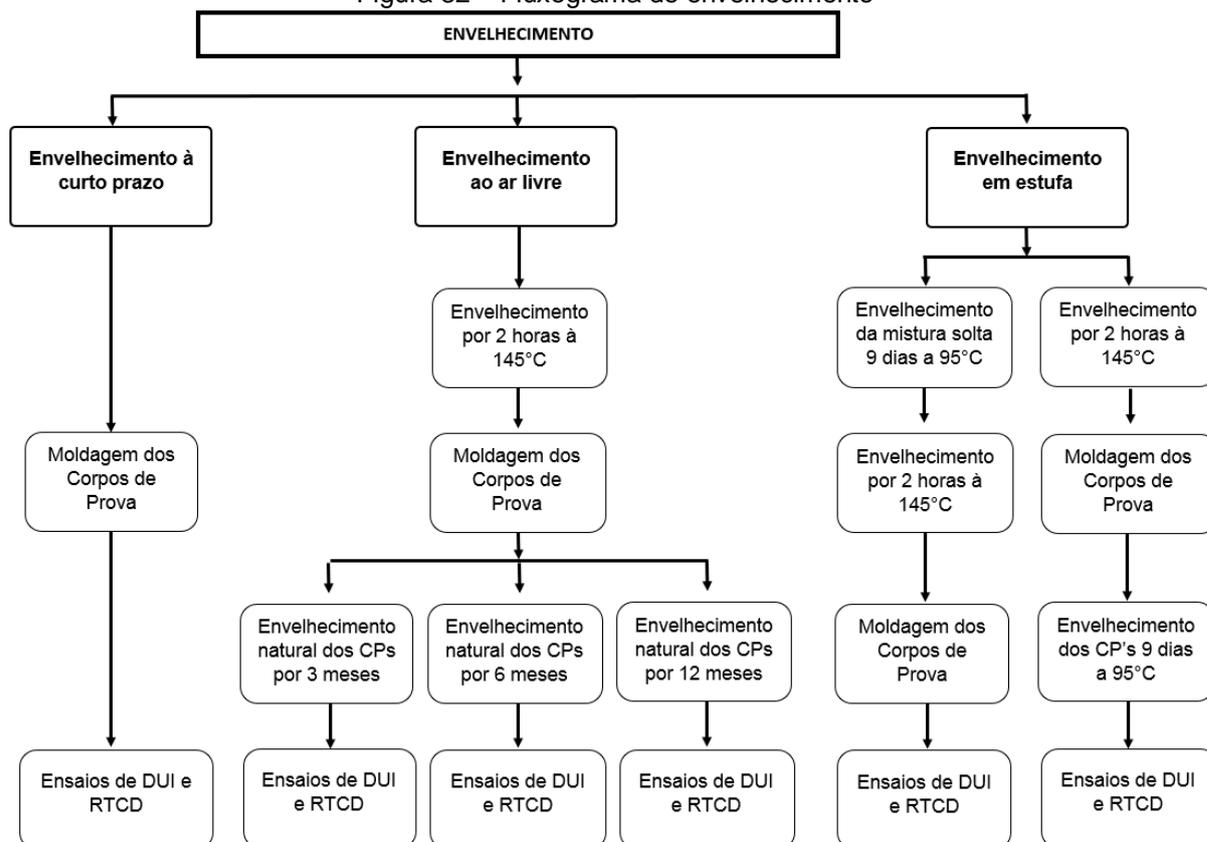
compactação das misturas asfálticas utilizadas foi de 155 ± 5 °C e 145 ± 5 °C, respectivamente, definidas a partir da curva de viscosidade do ligante CAP 50/70 empregado neste estudo.

Para a pesquisa, foram avaliadas quatro misturas, a primeira com 100% de agregado natural, denominada de 100% AN e outras três misturas com substituição de 25% por agregado natural por agregado siderúrgico, variando o nível de expansão da escória do menor para o maior, denominadas 25%LD<3%, 25%LD≈3% e 25%LD>3%, respectivamente. Todas as misturas estudadas, foram submetidas a diferentes processos de envelhecimento.

3.4 MÉTODOS EMPREGADOS PARA AVALIAR MISTURAS ENVELHECIDAS

Todas as quatro misturas estudadas, foram submetidas ao envelhecimento a curto prazo, por 2 horas em estufa a 145 °C. Além disso, foram avaliados três processos de envelhecimento a longo prazo, i.e., ao ar livre por (3, 6 e 12 meses), mistura solta em estufa e CP compactado em estufa. Estas misturas, foram submetidas aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral – RTCD, e ao ensaio de dano por umidade induzida – DUI, como descrito na Figura 32.

Figura 32 – Fluxograma de envelhecimento



Fonte: Acervo do Autor

3.4.1 Envelhecimento a Longo Prazo

3.4.1.1 Mistura solta envelhecida a longo prazo

Para a preparação dos corpos de prova que sofreram envelhecimento da mistura a longo prazo, foi primeiramente realizado a mistura dos agregados e ligante asfáltico segundo a norma do DNER 043/95 – ME. Essa mistura, foi espalhada em bandejas de maneira que se formasse uma fina camada e, subsequentemente, colocadas em estufa por um período de 9 dias à 95 °C (Figura 33), simulando um período de envelhecimento de 8 anos.

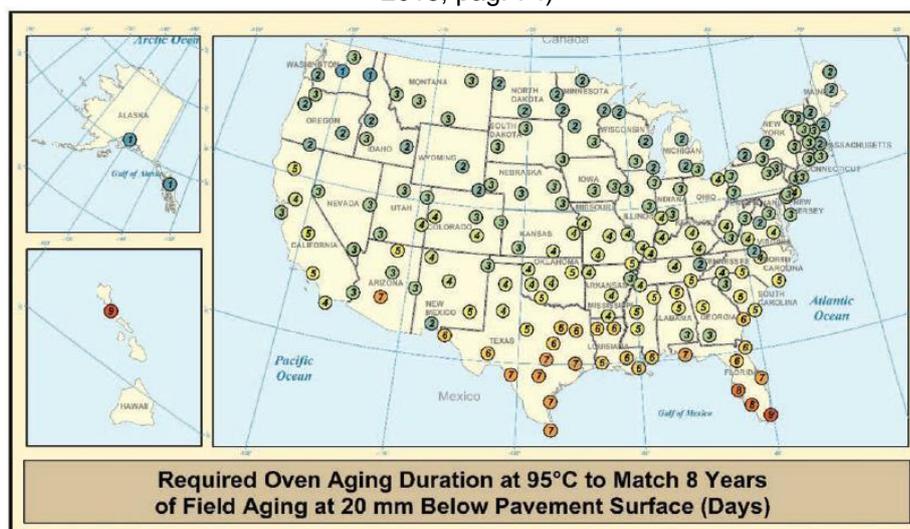
Figura 33 - Envelhecimento de mistura solta em estufa



Fonte: Acervo do autor

O período de envelhecimento de 9 dias à 95 °C foi escolhido com base no relatório “*Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction*”, apresentado por Kim et al. (2018), o qual apresenta o mapa mostrado na Figura 34. Segundo o estudo, para uma região com o clima do estado da Florida (Estados Unidos), seriam necessários até 9 dias à 95 °C para representar um envelhecimento de 8 anos a uma película de 20 milímetros na camada de revestimento. Como o clima local deste estudo, Vitória – ES, é o que mais se assemelha ao da Florida, foi escolhido este tempo e temperatura para o processo de envelhecimento das misturas estudadas em laboratório.

Figura 34 - Mapa ilustrando o tempo de envelhecimento baseado no clima de cada país (Kim et al., 2018, pag. 74)



Fonte: Acervo do autor

Após esse período, as misturas foram envelhecidas por mais duas horas a uma temperatura de 145°C para compactação. Foi necessário que a compactação fosse realizada com uma energia maior, devido ao aumento de rigidez do CAP. Dessa forma, foram aplicados 90 golpes em cada fase do corpo de prova e não apenas os 75 como os demais corpos de provas ensaiados, de forma a obter corpos de prova com VV de $4 \pm 0.5\%$ e dimensões de $63,5 \pm 1,3\text{mm}$.

3.4.1.2 Corpo de prova compactado envelhecido a longo prazo

Para o envelhecimento dos corpos de provas já compactados, foi adotado o procedimento normativo DNER 043/95 – ME, para a mistura e compactação. Após a mistura dos agregados ao ligante, a mistura foi envelhecida a curto prazo por 2h em estufa à 145°C, e subsequentemente, compactadas. Após a preparação dos corpos de prova com dimensões de $63,5 \pm 1,3\text{mm}$, os mesmos foram colocados em estufa por um período de 9 dias à 95 °C (Figura 35), para somente após esse período serem submetidos a ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

Figura 35 - Envelhecimento de corpos de prova compactados



Fonte: Acervo do autor

3.4.2 Corpo de prova compactado e envelhecido ao ar livre

Para avaliar o envelhecimento ao ar livre, foram preparadas as misturas, colocadas para envelhecer a curto prazo e depois compactou-se os corpos de provas com dimensões de $63,5 \pm 1,3$ mm, estes foram colocados em cima de um contêiner anexo ao laboratório de pesquisa, de maneira que os corpos de prova sofressem com a variação de calor e umidade da região local, conforme Figura 36.

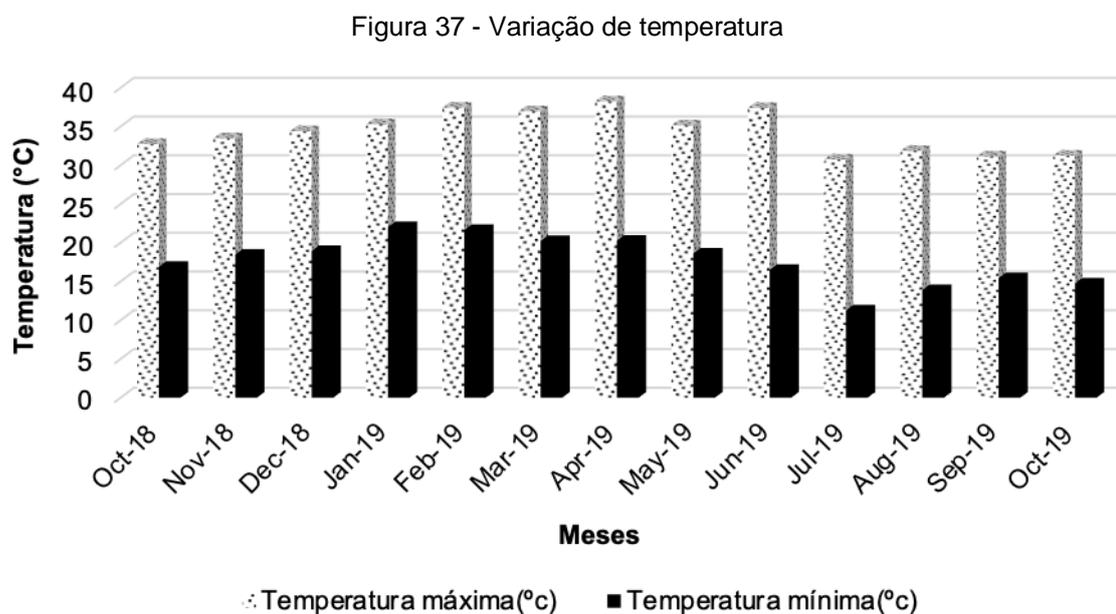
Figura 36 - Envelhecimento ao ar livre



Fonte: Acervo do autor

Foram compactados um total de 108 corpos de provas, para envelhecimento ao ar livre. Em outubro de 2018, foram compactados os primeiros 36 CPs, 9 CP para cada mistura estudada, 100% AN, e com 25% de LD em três níveis diferentes de expansão. Já em abril de 2019, foram compactados mais 36 CPs e em julho de 2019 os últimos 36 CPs para envelhecimento ao ar livre. Dessa forma, em outubro de 2019 os CPs tinham um tempo de envelhecimento de 12 meses, 6 meses e 3 meses respectivamente.

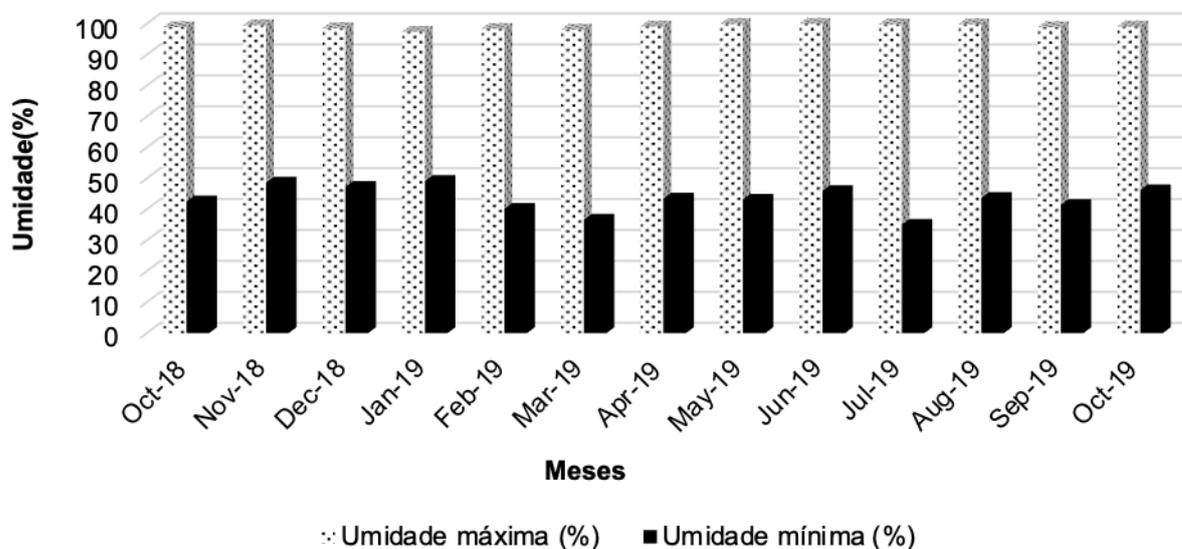
Na Figura 37, é mostrado a variação da temperatura mensal da região de estudo, apresentando uma temperatura máxima de aproximadamente 38 °C, em abril e uma temperatura mínima de aproximadamente 11 °C em julho.



Fonte: Acervo do autor

Na Figura 38, é mostrado a variação da umidade mensal da região de estudo, apresentando uma umidade máxima aproximadamente constante de 99% para todos os meses, e uma umidade mínima de aproximadamente 35%, no mês de julho. Sendo assim, o mês de julho é onde se apresenta a mínima temperatura e mínima umidade.

Figura 38 - Variação de umidade



Fonte: Acervo do autor

No período de envelhecimento a longo prazo ao ar livre, foi feito um monitoramento dos corpos de provas que ficaram 12 meses envelhecendo, estes foram medidos e pesados a cada três meses, para dessa forma acompanharmos suas variações geométricas e de volume de vazios.

3.5 ENSAIOS MECÂNICOS EM CONCRETO ASFÁLTICO

Para a realização dos ensaios mecânicos nos corpos de provas compactados e envelhecidos, foram selecionados dois ensaios: Resistência à tração por compressão diametral – DNIT 136/2017 – ME e Dano por umidade induzida – DNIT 180/2018 – ME. O ensaio de resistência a tração, foi selecionado, pois se queria avaliar como o concreto asfáltico se comportaria mecanicamente após seu envelhecimento e se as misturas com amostras de LD em diferentes níveis de expansão apresentariam resultados significativamente diferentes entre elas. O ensaio de dano por umidade induzido, foi escolhido pois queríamos aplicar um dano mais severo com água nos corpos de prova com agregado siderúrgico, visto que, a água é um dos principais responsáveis pela expansão da escoria LD, e assim compararmos se os corpos de provas com LD em diferentes níveis de expansão apresentariam resultados de resistência a tração significativamente diferentes.

3.5.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)

O ensaio de resistência à tração realizado na pesquisa segue a normativa do DNIT 136/2017 – ME, que é equivalente a norma americana ASTM D6931 (2012). Antes da realização do ensaio, o corpo de prova deve ser colocado em um compartimento de temperatura controlada de $25 \pm 0,5$ °C, por um período de 4 horas. Após esse período, o corpo de prova deve ser centralizado, com sua superfície cilíndrica entre os dois frisos metálicos, ajustar os pratos da prensa até que seja encontrada uma leve compressão, para manter o corpo de prova na posição de ensaio. A aplicação da carga vertical de compressão constante deve ter uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 01$ mm/s, até que o corpo de prova rompa e separe as duas partes do corpo de prova, segundo plano diametral vertical, encontrando dessa forma a carga de ruptura (F), descrita na Figura 39, e com ela calcular a resistência à tração (RT), com a Equação (6):

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad (6)$$

Onde:

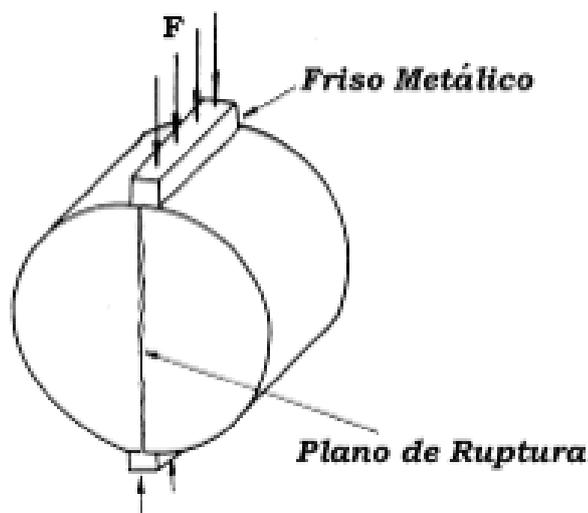
RT - Resistência à tração, em kgf/cm²;

F - Carga de ruptura, em kgf;

D - Diâmetro de corpo-de-prova, em cm;

H - Altura do corpo-de-prova, em cm.

Figura 39 - Ensaio de Compressão diametral



Fonte: DNIT 136/2017 – ME

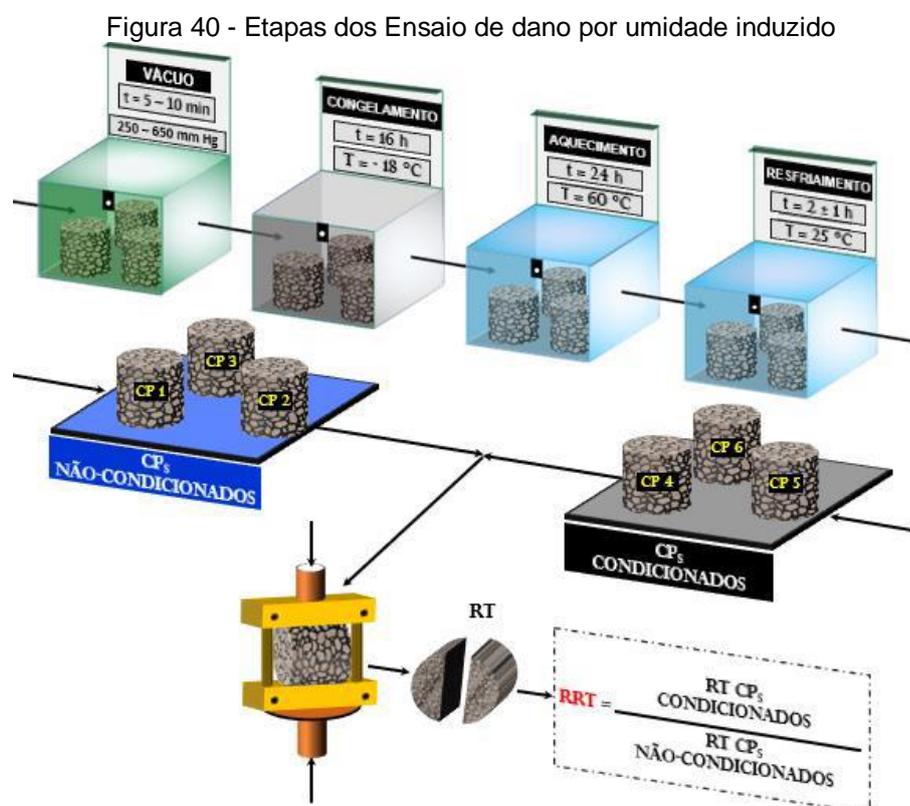
3.5.2 Dano por umidade induzido - DNIT 180/2018 – ME.

A amostra para execução do ensaio é constituída por seis corpos de provas, subdivididos em dois conjuntos de três corpos de provas. Os corpos de provas têm volume de vazios de $7 \pm 1\%$, sendo que esta porcentagem de vazios, é obtida experimentalmente alterando-se a energia de compactação, a altura ou a massa do CP em relação ao projeto original da mistura asfáltica em teste, mantendo-se o teor de ligante asfáltico do projeto de dosagem.

Neste trabalho, foi alterado a massa e o número de golpes de cada corpos de provas até que cada um atingisse um volume de vazios igual a $7 \pm 1\%$. Após verificar que todos os corpos de provas atingiram o volume de vazios desejado, foi verificado a massa de cada corpo de prova na condição seca (P1), bem como, a média aritmética de 3 leituras de altura e 3 leituras de diâmetro de cada CP.

Para a realização do ensaio, os CPs foram divididos em dois conjuntos com 3 corpos de provas cada. O primeiro conjunto, é submetido ao ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral conforme a DNIT 136/2017. O segundo conjunto, é submetido ao condicionamento de elevada severidade antes da realização da determinação da resistência à tração por compressão diametral. O condicionamento de elevada severidade, é realizado após

a saturação, devendo o CP estar com grau de saturação (GS) de $55\% < GS < 80\%$. O CP, é embalado em filme plástico e colocado dentro de um envoltório plástico impermeável com aproximadamente 10 ml de água. O envoltório plástico é então lacrado, para não permitir entrada ou saída de água e levado ao sistema de resfriamento capaz de manter a temperatura de $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ por 16 h. Passado esse período de resfriamento, leva-se o conjunto, envoltório mais CP, para um banho de água a $60 \pm 1^\circ\text{C}$. O envoltório e o filme plástico, devem ser removidos para liberação do corpo de prova ainda dentro do banho, assim que for possível sua retirada sem danificá-lo. O CP, é mantido no banho por $24 \pm 1\text{h}$. Após remoção do banho o CP, é levado imediatamente à submersão em um banho de água a $25 \pm 1^\circ\text{C}$, por 2 a 3 horas. A temperatura do banho, deve atingir o equilíbrio em no máximo 15 min. Após o condicionamento, é determinada a resistência à tração por compressão diametral conforme a norma do DNIT 136/2017. O esquema simplificado do ensaio descrito é mostrado na Figura 40.

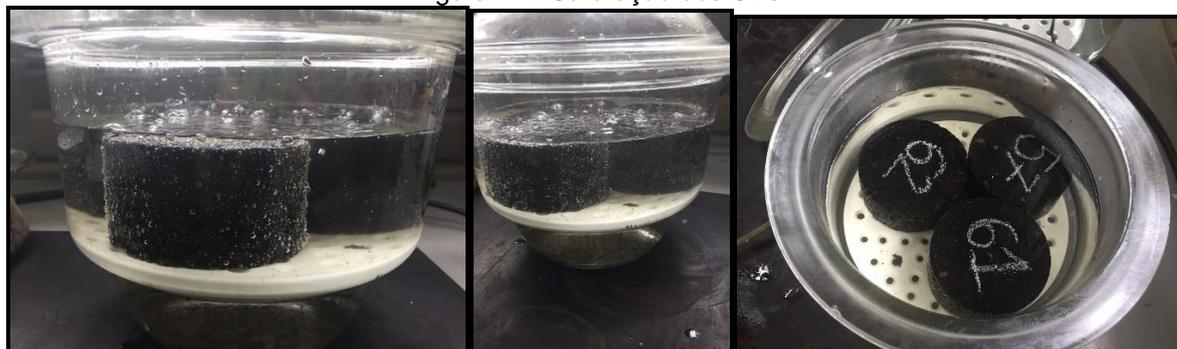


São feitas as médias da resistência a tração do grupo não-condicionado (RT) e do grupo condicionado (RTc). A razão de resistência à tração retida (RRT) expressa em porcentagem é determinada por meio da Equação (9).

$$RRT = 100 \times \frac{RTc}{RT} \quad (7)$$

A Figura 41, apresenta a fase de saturação dos corpos de provas estudados e a Figura 42, apresenta a fase de condicionamento dos corpos de provas estudados (gelo e degelo), para esta pesquisa fora realizados ensaios com 1 e 5 ciclos.

Figura 41 - Saturação dos CPs



Fonte: Acervo do autor

Figura 42 - Condicionamento dos CPs:

a) ciclo de congelamento à $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ e b) ciclo de descongelamento em banho de água a $60 \pm 1^\circ\text{C}$



(a)

(b)

Fonte: Acervo do autor

4 RESULTADOS

Nesse capítulo, são apresentados os resultados de todos os ensaios de caracterização individual dos materiais utilizados, bem como, os resultados de avaliação do comportamento mecânico à curto e longo prazo, utilizando os diferentes procedimentos de envelhecimento adotados nesta pesquisa. As discussões em cima de cada resultado têm, sobretudo, por finalidade a avaliação do efeito do nível de expansão de coproduto siderúrgico LD, no desempenho a longo prazo considerando sua viabilidade como material para uso em camada de revestimento asfáltico.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.1.1 Potencial de Expansão

Para analisar o efeito do nível de expansão nas propriedades individuais da escória LD e suas propriedades volumétricas, foi feita a caracterização de amostras de escória LD em três níveis distintos de expansão. Dessa forma, primeiramente, é apresentado aqui os resultados de nível de expansão volumétrica encontrados para cada amostra de coproduto LD, apurados pelo ensaio de potencial de expansão DNIT-ME 113/2009. A evolução da expansão ao longo do ensaio, é apresentada na Figura 43. Observa-se que a expansão ao final dos 14 dias de ensaio foi de 1,63%, 2,31% e 5,92%, para as escórias LD<3%, LD≈3% e LD>3% respectivamente.



Fonte: Acervo do autor

Observa-se que, conforme esperado, o coproduto não curado apresenta maior nível de expansão (5,92%). Este valor, é próximo ao valor encontrado por Schumacher (2018), que foi de 6,71%, para a escórias não curadas obtidas pela mesma empresa. Variações maiores podem ser encontradas, se o coproduto for originário de outra indústria siderúrgica, pois a composição química do coproduto depende dos materiais e processo de fundição utilizados na aciaria.

Na Tabela 7, são apresentados os resultados de caracterização requeridos pelo DNIT-ES 031/2006 e encontrados para os agregados utilizados neste estudo.

Tabela 7 - Resultado da caracterização da escória LD em diferentes níveis de expansão

Ensaio	Limites (DNIT-ES 031/2006)	LD<3%	LD≈3%	LD>3%	AN
Massa específica (g/cm ³)	-	3,12	3,12	3,26	2,84
Absorção (%)	-	3,4	2,44	1,95	0,49
Abrasão Los Angeles (%)	Máx. 50%	18	20	19	42
Durabilidade (%)	Máx. 12%	0,7	1,62	2,36	0,6
Adesividade	-	S	S	S	S
Massa unitária (kg/dm ³)	-	2,02	2,01	2,14	1,57
Equivalente de areia (%)	> 55 %	85	79	70	74
Expansão acum. (%)	Máx 3%	1,63	2,31	5,92	-

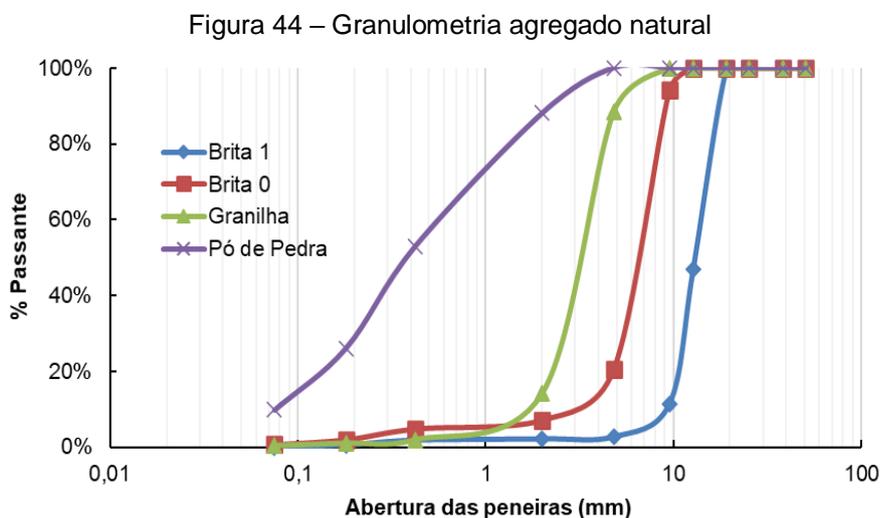
Fonte: Acervo do autor

Observa-se que houve mudança principalmente nos valores de absorção do material devido à variação do nível de expansão, o que pode acarretar a alterações tanto nos parâmetros volumétricos, quanto mecânicos das misturas asfálticas que fizerem uso destes materiais. Nota-se que a absorção das escórias é bem superior ao do agregado natural e tende a aumentar quando o nível de expansão é reduzido, o que pode levar a incrementos do teor de CAP do projeto. Schumacher (2018), por exemplo, observou que o teor ótimo de CAP passou de 5,9% para 5,14% quando o teor de substituição de agregado natural por agregado siderúrgico foi de 50% para 25%.

Ressalta-se também, que para os valores de resistência à abrasão das escórias analisadas, é possível observar que a sua perda é menor do que o agregado natural, confirmando a maior resistência mecânica deste material se comparado com o AN, possivelmente relacionado a composição química dos agregados siderúrgicos, com

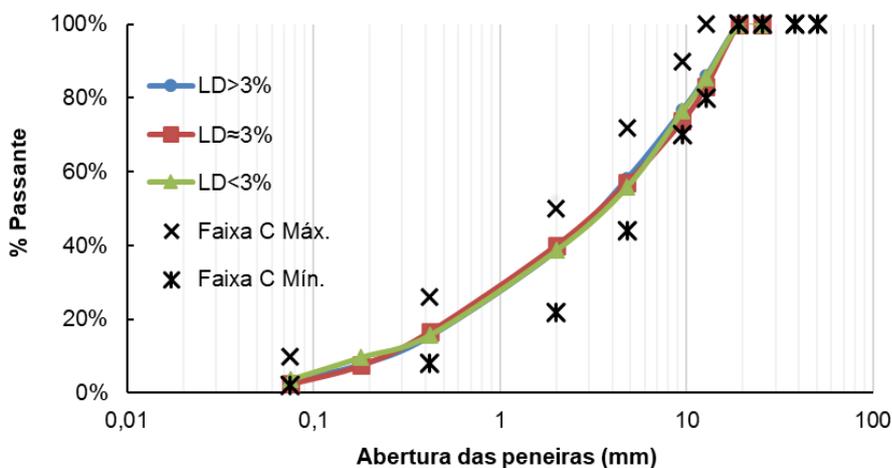
a presença de elementos metálicos oriundos do processo siderúrgico. Moura (2020), apresenta os resultados de nanoindentação, onde foi verificado que as escórias LD possuem módulo de elasticidade variando de 80 a 170 GPa e dureza de 6 a 14 GPa, enquanto que os agregados naturais apresentaram módulo de elasticidade, variando de 70 a 95 GPa e dureza de 8 a 12 GPa o que corrobora com a resistência mecânica elevada das escórias em comparação ao AN encontrada neste estudo.

Foi realizada a análise granulométrica dos agregados naturais, Figura 44, e das amostras de LD em diferentes níveis de expansão, Figura 45.



Fonte: Acervo do Autor

Figura 45 - Granulometria LD após ser corrigida

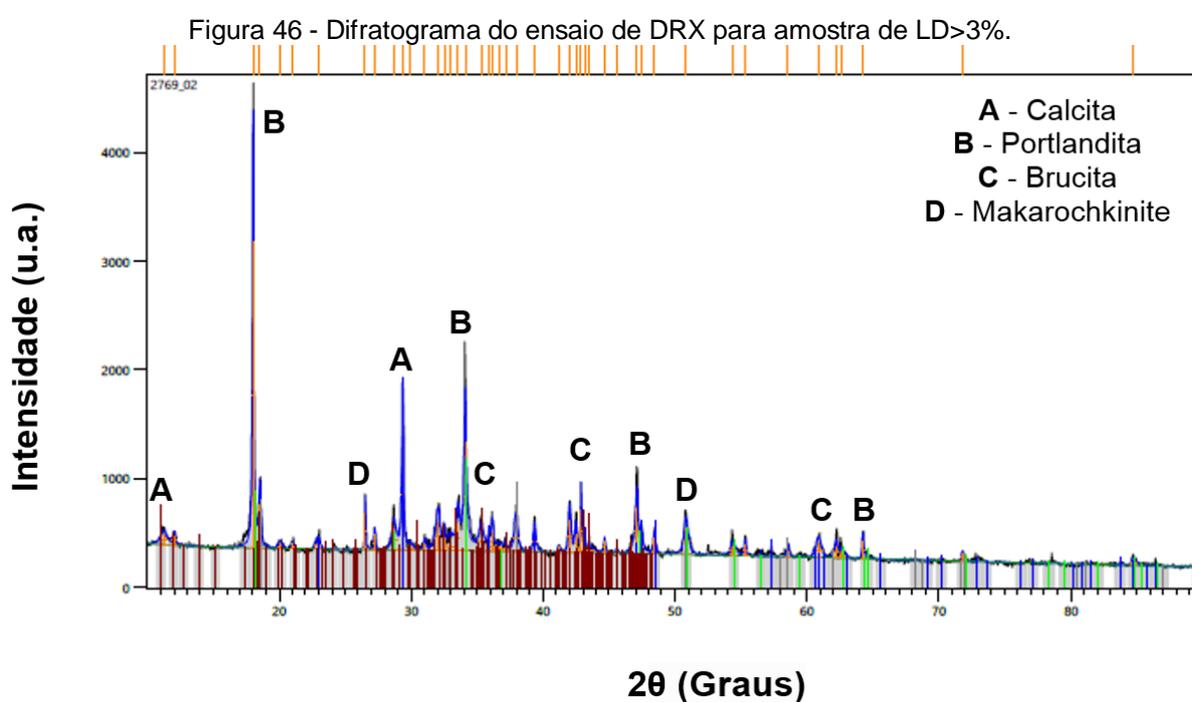


Fonte: Acervo do Autor

4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A análise do DRX, fornece a composição mineralógica dos materiais de estrutura cristalina, como pode ser visto no difratograma obtido pelo DRX,

Figura 46. O ensaio de DRX, foi executado para amostra de LD recém geradas (LD>3%), onde suas características mineralógicas não sofreram alterações ao longo do processo de hidratação.



Fonte: Acervo do Autor

Com a análise do difratograma, é possível identificar os minerais componentes da amostra de agregado siderúrgico LD. Para esclarecer as informações sobre a composição mineralógica e seus minerais predominantes, também são apresentados os minerais predominantes nos agregados calcários e graníticos presentes em outras pesquisas, Tabela 8.

Tabela 8 - Composição mineralógica dos agregados.

Amostra deste estudo	Zhang et al. (2015)		Apeageyi, Grenfell e Airey (2014)	
	CALCÁRIO	GRANITO	CALCÁRIO	GRANITO
LD				
Calcita	Calcita	Clorita	Calcita	Quartzo
Portlandita	Dolomita	Albita	Dolomita	Albita
Brucita	Argilomineral	Anortita	Argilomineral	Feldspato
Makarochkinite	Outros	Quartzo	Outros	Clorita
Outros		Feldspato		Muscovita
		Muscovita		Anortita
		Outros		Outros

Fonte: Acervo do Autor

Com os resultados, é possível observar que a amostra de LD se aproxima mais de uma rocha calcária devido à presença de mais picos de calcita, e não possui minerais comuns às rochas graníticas. A presença de substâncias como calcita, portlandita e brucita já era esperado devido à grande quantidade de cálcio e magnésio nos materiais utilizado para a produção do aço. O trabalho de Apeageyi, Grenfell e Airey (2014), descreve que a resistência à umidade em rochas calcárias é maior que à de rochas graníticas, isto se deve, em parte, à sua composição mineralógica: albita, feldspato e quartzo, que estão associados à baixa adesividade e ruptura na interface agregado-betume. Zhang et al. (2015), relaciona a baixa resistência à umidade para os argilominerais e anortita, enquanto a calcita está ligada à boa resistência.

4.3 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

Com a finalidade de verificar a alteração da quantidade de cada composto químico ao decorrer da diminuição da expansão da escória, foi realizado o ensaio de Fluorescência de Raios-X, que é um ensaio qualitativo e quantitativo. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição mineralógica percentual das amostras de LD

Óxidos	LD>3% (5,92%)	LD≈3% (2,31%)	LD<3% (1,63%)
Al ₂ O ₃	7,14	3,49	1,84
CaO	38,16	36,99	41,31
Cr ₂ O ₃	0,19	0,15	0,13
Fe ₂ O ₃	17,1	17,54	21,33
K ₂ O	0,11	<0,01	<0,01
MgO	9,99	11,19	9,17
MnO	2,25	1,93	2,03
Na ₂ O	<0,1	<0,1	<0,1
P ₂ O ₅	0,76	0,78	1,06
SiO ₂	8	8,05	8,31
TiO ₂	0,33	0,28	0,27
ZrO ₂	-	-	-
SO ₃	0,24	0,4	0,18
ZnO	<0,01	<0,01	<0,01

Fonte: Acervo do Autor

A composição química da escória de aciaria, é formada por uma estrutura heterogênea, que consiste essencialmente em óxidos simples. Destacando-se os óxidos de cal, óxido de magnésio, ferro, sílica e alumina, demais elementos estão presentes como, enxofre, manganês, álcalis e outros.

Com relação as mudanças dos compostos químicos em função da cura da escória, é possível verificar que houve uma diminuição dos Al₂O₃ com a diminuição da expansão da escória (maior tempo de cura), e uma diminuição e depois estabilização da MnO resultado, este, condicente com a diminuição da expansão já que o MnO é um dos responsáveis pela expansão da LD. Entretanto, o CaO que também é um dos grandes responsáveis pela expansão da LD permaneceu sem muita alteração para as três amostras estudadas. No entanto, ressalta-se que pode ter havido mudança nos teores de CaO livres, o que não foi verificado neste estudo.

A diminuição do Al₂O₃ com a diminuição da expansão e a pouca variação do CaO, estão condicentes com o que foi apresentado por Schumacher (2018), como podemos ver na Tabela 10. Correlacionando o comportamento na mistura asfáltica à composição da LD, tem-se resultados diferentes dos encontrados por Bagampadde, Isacsson e Kiggundu (2005), uma vez que, os autores não observaram uma boa

correlação entre a sensibilidade à umidade e os compostos de silício e de ferro. Resultados diferentes do que foi constatado por Júnior (2018) e Cala et al. (2019; 2019b) e na presente pesquisa Júnior (2018) e Cala et al. (2019; 2019b), observaram uma forte correlação dos compostos silício e ferro ao recobrimento do ligante ao agregado. Para o presente trabalho, o composto Fe_2O_3 , presente em grande quantidade nas misturas com LD, pode estar agindo em favor da adesividade. Júnior (2018), foi o único que encontrou correlação entre cálcio e o desempenho dos agregados na adesividade, enquanto nos demais, o cálcio não propiciou forte correlação de incremento nesse parâmetro.

Tabela 10 - Principais compostos da escória de aciaria LD

Óxidos	Concentração (%)		
	LD > 3%	LD \cong 3%	LD < 3%
Al_2O_3	4,9	2,2	2,22
CaO	46,54	45,39	43,4
Fe_2O_3	26,4	17,4	16,35
K_2O	< 0,1	0,03	0,04
MgO	5	2,45	2,39
MnO	3,2	2,03	1,85
Na_2O	0,17	0,04	0,04
P_2O_5	1,3	0,85	0,93
SiO_2	12,7	9,18	8,12
SO_3	0,16	0,21	0,18
SrO	0,1	-	
TiO_2	0,36	0,21	0,19

Fonte: Schumacher 2018

4.4 RESISTENCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS ESTUDADAS

Foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral das misturas estudadas com envelhecimento a curto e longo prazo em laboratório, bem como, dos CP's envelhecidos ao ar livre. Os resultados são apresentados nas Tabela 11 à Tabela 16 e graficamente na Figura 47.

Tabela 11 - Resultados de resistência à tração, envelhecimento a curto prazo

CP ENVELHECIDO À CURTO PRAZO (ECP)						
MISTURAS	RT (Mpa)	RT Média (MPa)	Desvio Padrão	VV (%)	VV Média (%)	Desvio Padrão
100% AN	1,51	1,62	0,08994	3,50	3,43	0,000656
	1,63			3,44		
	1,73			3,35		
25% LD<3%	1,39	1,56	0,1212	3,36	3,35	0,000905
	1,59			3,32		
	1,68			3,37		
25% LD≈3%	1,63	1,57	0,05888	3,15	3,16	0,001322
	1,49			3,10		
	1,59			3,24		
25% LD>3%	1,65	1,59	0,04497	3,84	3,62	0,002268
	1,54			3,52		
	1,59			3,50		

Fonte: Acervo do Autor

Tabela 12 - Resultados de resistência a tração, mistura envelhecimento a longo prazo

MISTURA SOLTA ENVELHECIDA A LONGO PRAZO (ELP) EM ESTUFA						
MISTURAS	RT (Mpa)	RT Média (MPa)	Desvio Padrão	VV (%)	VV Médio (%)	Desvio Padrão
100% NA	2,48	2,29	0,13491	3,6	3,71	0,00085
	2,18			3,73		
	2,21			3,81		
25% LD < 3%	1,95	1,95	0,02055	4,49	4,21	0,00197
	1,92			4,11		
	1,97			4,04		
25% LD ≈ 3%	1,93	1,95	0,02357	3,82	3,89%	0,00078
	1,98			4		
	1,93			3,87		
25% LD > 3%	1,86	1,94	0,06164	3,88	3,97%	0,00304
	2,01			4,39		
	1,95			3,66		

Fonte: Acervo do Autor

Tabela 13 - Resultados de resistência a tração, CP envelhecimento a longo prazo

CP ENVELHECIDO A LONGO PRAZO (ELP) EM ESTUFA								
MISTURAS	RT (Mpa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	VV Inicial (%)	VV Médio Inicial (%)	VV Final (%)	VV Médio Final (%)	Desvio Padrão
100% NA	2,08			3,74		3,74		
	1,99	2,07	0,05793	3,66	3,66	3,5	3,57	0,00123
	2,13			3,58		3,47		
25% LD < 3%	1,87			4,46		4,26		
	1,84	1,88	0,033	4,39	4,36	4,16	4,27	0,00093
	1,92			4,24		4,39		
25% LD ≈ 3%	1,84			3,42		3,52		
	2,11	1,92	0,1297	3,59	3,59	3,76	3,84	0,00303
	1,83			3,75		4,25		
25% LD > 3%	1,94			4,1		4,03		
	1,91	1,93	0,01414	3,87	3,84	3,95	3,91	0,00116
	1,94			3,54		3,75		

Fonte: Acervo do Autor

Tabela 14 - Resultados de resistência a tração, CP envelhecimento 3 meses ao ar livre

CP ENVELHECIDOS AO AR LIVRE 3 MESES								
MISTURAS	RT (Mpa)	RT Média (MPa)	Desvio Padrão	VV Inicial (%)	VV Médio Inicial	VV Final (%)	VV Médio Final (%)	Desvio Padrão
100% AN	1,4			3,17		2,01		
	1,25	1,3	0,06847546	3,45	3,36	2,79	2,54	0,37249907
	1,26			3,46		2,81		
25% LD < 3%	1,25			4,04		7,64		
	1,28	1,21	0,07874008	4,5	4,33	5,01	5,91%	1,2258965
	1,1			4,46		5,07		
25% LD ≈ 3%	1,33			4,42		4,3		
	1,31	1,28	0,05715476	3,38	3,76	3,5	3,75%	0,00387487
	1,2			3,47		3,45		
25% LD > 3%	1,18			4,38		4,55		
	1,16	1,17	0,00942809	3,74	3,97	7,59	5,35%	1,60532447
	1,16			3,78		3,91		

Fonte: Acervo do Autor

Tabela 15 - Resultados de resistência a tração, CP envelhecimento 6 meses ao ar livre

CP ENVELHECIDOS AO AR LIVRE 6 MESES								
MISTURAS	RT (Mpa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	VV Inicial (%)	VV Médio Inicial (%)	VV Final (%)	VV Médio Final (%)	Desvio Padrão
100% AN	1,29			3,45		3,46		
	1,28	1,23	0,08730534	3,65	3,59	3,65	3,55	0,07788881
	1,1			3,68		3,54		
25% LD < 3%	1,4			4,42		4,64		
	1,37	1,34	0,0601849	3,52	3,86	3,55	3,88	0,72158776
	1,26			3,63		3,46		
25% LD ≈ 3%	1,44			3,56		3,15		
	1,45	1,45	0,00471405	3,67	3,62	3,46	3,20	0,19154344
	1,45			3,64		3		
25% LD > 3%	1,35			3,48		3,5		
	1,41	1,35	0,04496913	3,64	3,56	3,36	3,54	0,16573071
	1,3			3,57		3,76		

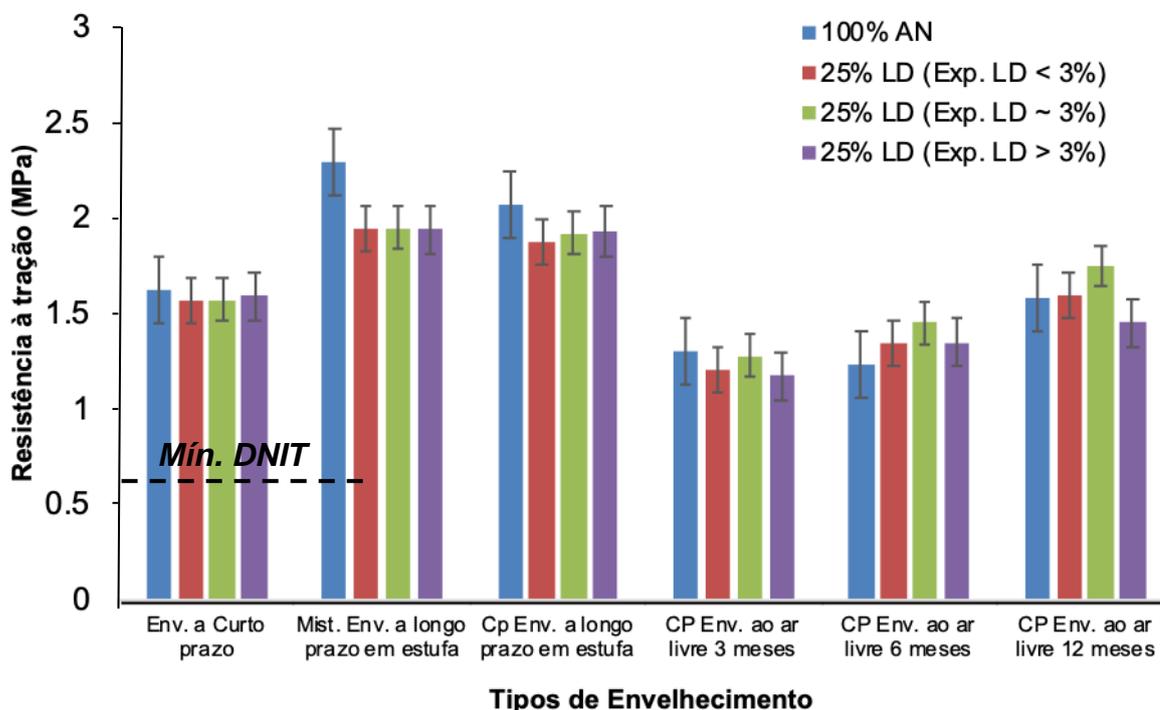
Fonte: Acervo do Autor

Tabela 16 - Resultados de resistência a tração, CP envelhecimento 12 meses ao ar livre

CP ENVELHECIDOS AO AR LIVRE 12 MESES								
MISTURAS	RT (Mpa)	RT Média (MPa)	Desvio Padrão	VV Inicial (%)	VV Médio Inicial (%)	VV Final (%)	VV Médio Final (%)	Desvio Padrão
100% AN	1,64			3,64		3,81		
	1,56	1,58	0,04320494	3,63	3,63	3,76	3,75	0,05792716
	1,54			3,63		3,67		
25% LD < 3%	1,58			3,97		4,54		
	1,7	1,6	0,07483315	4,08	3,99	3,74	4,14	0,32663265
	1,52			3,92		4,15		
25% LD ≈ 3%	1,82			4,24		3,93		
	1,74	1,75	0,05354126	3,5	3,90	3,75	3,68	0,23790755
	1,69			3,96		3,36		
25% LD > 3%	1,47			3,58		3,65		
	1,52	1,45	0,07133645	3,59	3,56	3,63	3,50	0,20286832
	1,35			3,5		3,21		

Fonte: Acervo do Autor

Figura 47 - Resultados de resistência à tração



Fonte: Acervo do Autor

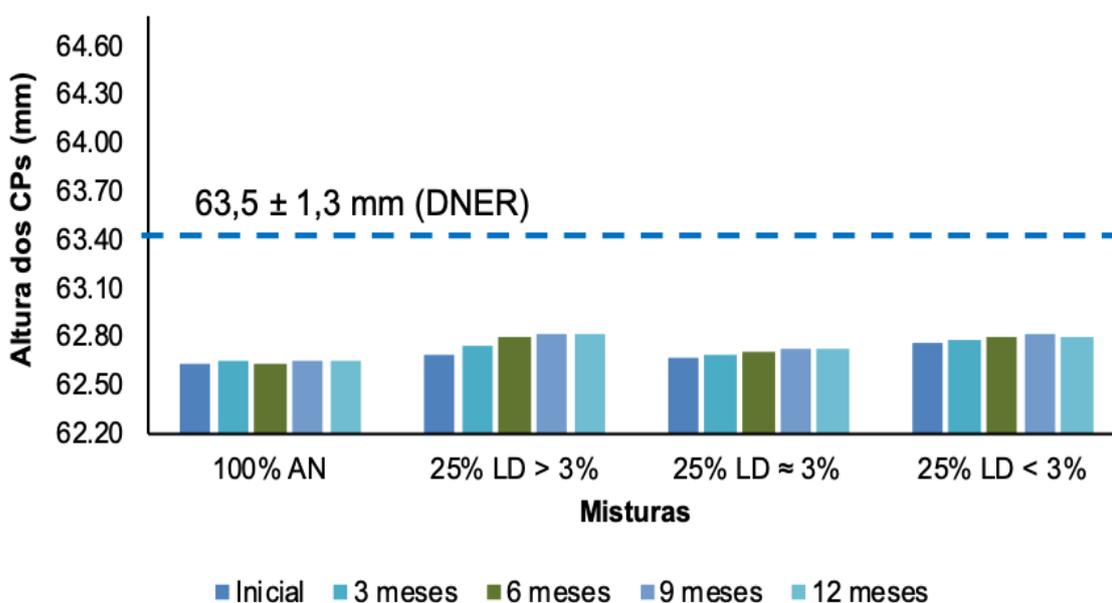
Verifica-se que todos os resultados ficaram acima do limite mínimo de 0,65 MPa, descrito na especificação de serviço do DNIT 031/2006 ES, mesmo para valores inferiores do desvio padrão apresentado no gráfico. Comparando as misturas com substituição de AN por LD é possível inferir sobre os efeitos do nível de expansão no desempenho mecânico que, não houve diferença considerável na resistência à tração de misturas produzidas com escória em diferentes níveis de expansão. No entanto, observou-se um maior incremento de RT para misturas envelhecidas sem uso de agregado siderúrgico. Este resultado gerou os seguintes questionamentos: i) a escória pode ter mudado quimicamente o ligante de forma a retardar os efeitos do envelhecimento, ou ii) as escórias sofreram expansão, resultando num decréscimo de resistência à tração por conta de microtrincas e/ou fraturas adesivas do sistema ligante-agregado. Para avaliar esta hipótese, foram realizados ensaios de expansão em amostras de agregados após estes terem sido submetidos aos diferentes processos de envelhecimento. Estes serão apresentados mais à frente.

Para as misturas envelhecidas ao ar livre, não foram encontradas diferenças consideráveis nos valores de RT. Isso pode indicar, que os efeitos expansivos podem ser manifestados para idades superiores a 12 meses.

4.5 ANALISE GEOMETRICA DOS CPs ENVELHECIDOS AO AR LIVRE

A Figura 48, apresenta a variação da altura dos CPs envelhecidos ao ar livre a cada 3 meses ao longo de um ano.

Figura 48 - Altura dos CPs ao longo do tempo



Fonte: Acervo do Autor

Analisando a altura dos corpos de provas ensaiados, é possível verificar que não houve variação significativa da altura, visto que a variação ao longo de um ano foi menor que 0,15 milímetros, para todas as misturas ensaiadas.

4.6 DANO POR UMIDADE INDUZIDO – DUI

Os resultados dos ensaios de dano por umidade induzido em amostras submetidas 1 ciclo e 5 ciclos de condicionamento térmico estão apresentados na Tabela 17 e Tabela 18, respectivamente.

Tabela 17 - Valores de RT para CPs submetidos a 1 ciclo de DUI (continua).

Misturas	Envelhecimento	VV (%)	RT (MPa)	RT _{méd} (MPa)	RT _c (MPa)	RT _{Cméd} (MPa)	RRT (%)	
100% AN	Ar livre	12 meses	3,34	1,64		2,05	137,97	
			3,48	1,56	1,58	2,13		
			3,69	1,54		2,36		
		6 meses	3,93	1,29		1,34		111,17
			3,92	1,28	1,22	1,42		
			4,17	1,10		1,32		
	3 meses	3,96	1,40		1,99	140,15		
		3,93	1,25	1,30	1,78			
		3,83	1,26		1,71			
	25% LD<3%	Ar livre	12 meses	3,28	1,58		2,18*	118,37
				4,66	1,69	1,60	1,79	
				4,29	1,52		1,70	
6 meses			4,02	1,40		1,70	127,24	
			3,12	1,36	1,34	1,71		
			3,05	1,26		-		
3 meses		4,48	1,25		1,91	142,70		
		6,05	1,28	1,21	1,64			
		6,09	1,10		1,63			
25% LD≈3%		Ar livre	12 meses	4,23	1,82		1,90	106,48
				3,65	1,74	1,75	1,96	
				4,02	1,69		1,73	
	6 meses		3,59	1,44		1,69	118,66	
			2,63	1,45	1,45	1,59		
			3,53	1,45		1,87		
	3 meses	5,25	1,33		1,45	116,15		
		3,18	1,31	1,28	1,53			
		5,14	1,20		1,48			
	25% LD>3%	Ar livre	12 meses	3,34	1,47		1,59	115,67
				3,98	1,52	1,45	1,65	
				4,09	1,35		1,78	
6 meses			2,92	1,35		1,98	138,33	
			3,25	1,42	1,36	1,87		
			3,50	1,30		1,78		
3 meses		3,97	1,18		1,70	150,86		
		4,29	1,16	1,17	1,74			
		3,83	1,16		1,84			

Tabela 18 – Valores de RT para CPs submetidos a 1 ciclo de DUI (conclusão).

Misturas	Envelhecimento	VV (%)	RT (MPa)	RT _{méd} (MPa)	RT _c (MPa)	RT _c _{méd} (MPa)	RRT (%)
100% AN		6,64	1,21		0,91		70,43
		7,41	1,34	1,24	0,75	0,87	
		7,63	1,17		0,96		
25% LD<3%	Curto Prazo	7,24	1,15		1,06		92,15
		7,48	1,04	1,15	1,06	1,06	
		7,38	1,25		1,05		
25% LD≈3%		7,15	1,26		1,20		89,78
		7,88	1,27	1,24	1,00	1,11	
		7,39	1,19		1,14		
25% LD>3%		7,17	1,41		0,89		74,23
		7,10	1,31	1,31	0,94	0,97	
		7,40	1,20		1,08		
100% AN		6,77	1,72		1,23		74,34
		6,00	1,72	1,77	1,49	1,31	
		6,27	1,86		1,22		
25% LD<3%	CP Envelhecido	7,68	1,52		1,23		88,14
		7,38	1,39	1,49	1,49	1,31	
		7,21	1,56		1,22		
25% LD≈3%		6,70	1,83		1,55		78,06
		6,73	1,35*	1,79	1,20	1,39	
		6,90	1,74		1,43		
25% LD>3%		6,67	1,94		1,50		78,19
		7,79	1,59	1,77	1,33	1,38	
		7,27	1,20		1,31		

Fonte: Acervo do Autor

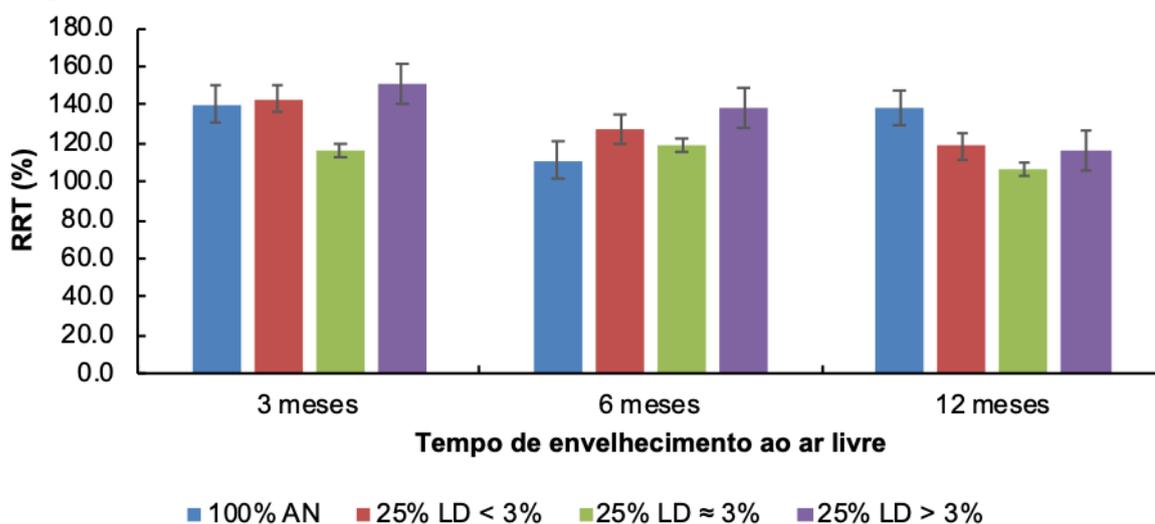
Como pode ser observado na Tabela 17, os volumes de vazios das amostras envelhecidas ao ar livre são $4,0 \pm 1,0\%$, pois estes foram compactados inicialmente segundo as condições de projeto. Devido a isto, os resultados são analisados separados das amostras que apresentam volume de vazios especificado na norma do ensaio de DUI, i.e. $7,0 \pm 1,0\%$.

Segundo Benucci et al. (2007), para misturas asfálticas contínuas, os valores de RRT mínimo para que a mistura seja aprovada é de 70%, sendo o RRT a razão entre a tração da amostra condicionada sobre a amostra não condicionada. Dessa forma, todas as amostras analisadas atenderam a este critério.

Para as amostras de envelhecimento ao ar livre, é possível verificar que todos seus valores de RRT foram maiores que 100%, conforme mostrado na Figura 49, mesmo

para o menor valor do desvio padrão, significando que os valores de resistência a tração com condicionamento foram maiores que os não condicionado, resultado esse que pode ter relação com o volume de vazios inferior destas em relação às amostras envelhecidas em laboratório. Pode-se inferir, que devido ao menor volume de vazios, o nível de severidade a que estas foram submetidas no condicionamento foi minimizado pelo menor volume preenchido por água durante a saturação e dessa forma, menor expansão volumétrica ocasionada pela água durante o ciclo de congelamento. Analisando as amostras com 25% de LD em diferentes níveis de expansão, não foi possível fazer nenhuma afirmação do seu comportamento, entretanto é possível observar que, a amostra de 25% LD \cong 3, obteve os valores de RRT menores que as misturas com diferentes valores de expansão.

Figura 49 – Resultado de RRT para CPs submetidos a 1 ciclo de DUI envelhecidos ao ar livre.

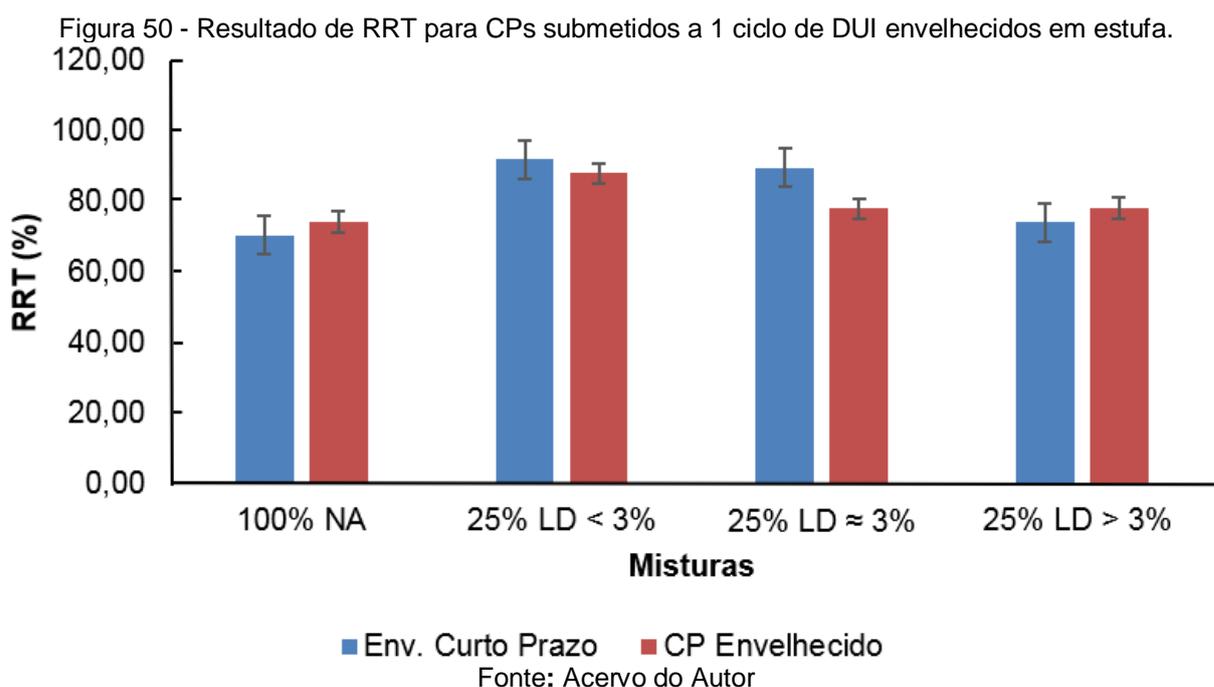


Fonte: Acervo do Autor

Para as amostras envelhecidas em laboratório, conforme mostrado na figura 49, é possível verificar que os valores de RRT foram menores que 100%, mesmo para o maior valor do desvio padrão. Porém, todos os CP's ficaram acima do mínimo de 70% requerido pela norma DNIT 031 (2006). Observa-se que as amostras com substituição do agregado natural por coproduto LD, apresentaram valores maiores que as amostras com 100% de agregado natural, indicando que houve uma melhora na resistência ao DUI com a substituição do AN por LD. Este resultado, pode estar relacionado a presença dos minerais de calcita, conforme apresentado na análise mineralógica, que aumenta a adesão ligante-agregado. Além disso, a presença do

óxido de Ferro (Fe_2O_3), também pode ter contribuído para a melhoria na adesividade das misturas asfálticas, conforme descrito em Júnior (2018) e Cala et al. (2019; 2019b)

A redução dos valores de RRT está relacionada ao condicionamento que foi comum a todas as misturas sendo até mais severo (maior percentual) para as misturas com 100% de AN, que pode ser atribuído a menor adesão ligante agregado já descrito anteriormente. Para a mistura com LD<3%, foi ainda menor a redução dos valores de RT, resultando numa maior RRT. Para o maior nível de expansão, observou-se uma redução maior (porém similar ao do AN), mostrando que apenas para a mistura com 25% de LD>3% a expansão pode ter contribuído para diminuição da RRT desta mistura, embora os valores estejam ainda próximos.



A Tabela 18, apresenta os valores de RRt para CPs submetidos a 5 ciclos de gelo e degelo, condição ainda mais severa para que os efeitos da expansão devido às condições de umidade e calor possam ser mais ressaltados. Os resultados são apresentados graficamente nas Figuras 51 e 52.

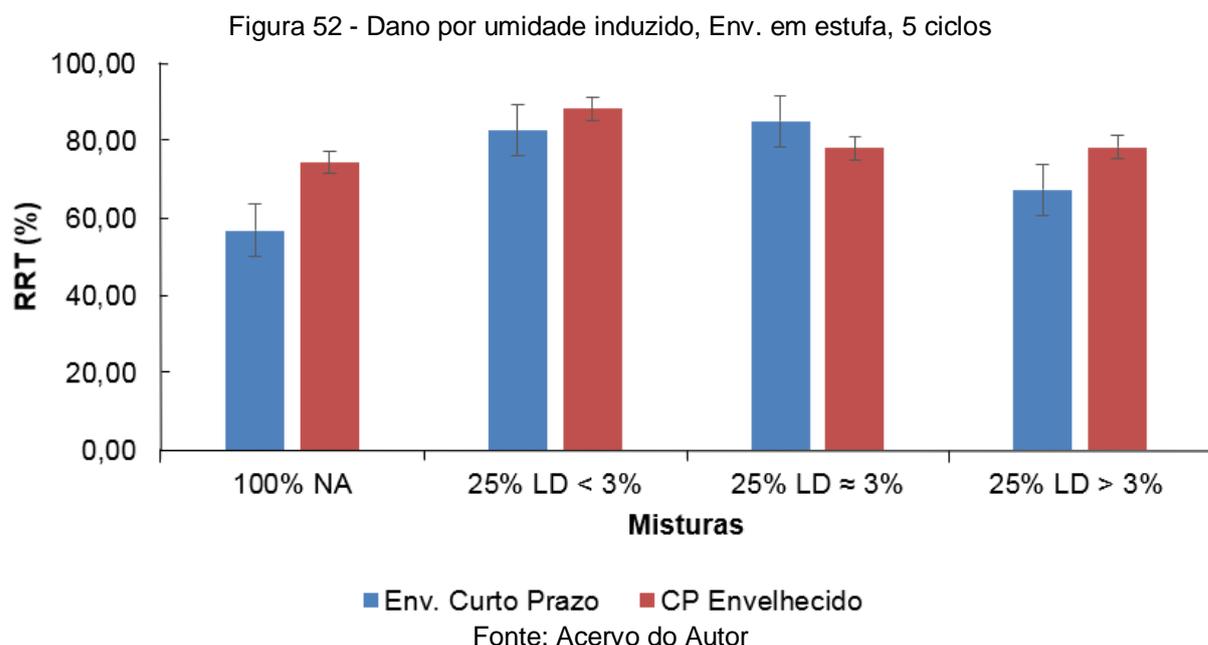
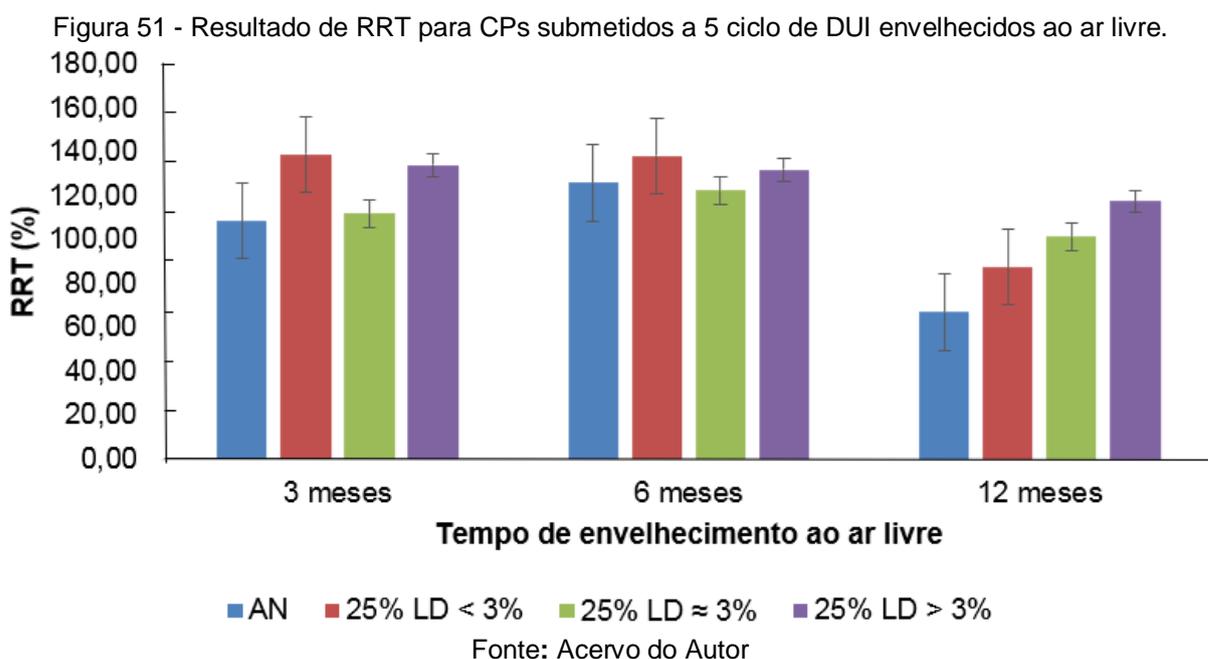
Tabela 18 - Valores de RRT para CPs submetidos a 5 ciclos de DUI (continua).

Misturas	Envelhecimento	VV (%)	RT (MPa)	RT _{méd} (MPa)	RT _c (MPa)	RT _{Cméd} (MPa)	RRT (%)		
100% AN	Ar livre		4,01	1,64		0,97	67,09		
		12 meses	3,13	1,56	1,58	1,15		1,06	
			3,99	1,54		1,57*			
	Ar livre	6 meses		3,71	1,29		1,40	125,61	
				3,91	1,28	1,22	1,68		1,54
				4,03	1,10		1,53		
		3 meses		2,31	1,40		1,34	108,44	
				2,73	1,25	1,30	1,48		1,41
				2,57	1,26		1,42		
	25% LD<3%	Ar livre		4,22	1,58		1,51	87,28	
			12 meses	3,24	1,69	1,60	1,45		1,39
				3,91	1,52		1,22		
Ar livre		6 meses		3,66	1,40		1,75	138,06	
				4,72	1,36	1,34	1,95		1,85
				4,43	1,26		1,29*		
		3 meses		4,46	1,25		1,75	138,84	
				5,49	1,28	1,21	1,62		1,68
				5,77	1,10		1,67		
25% LD≈3%		Ar livre		3,59	1,82		1,26*	101,14	
			12 meses	3,68	1,74	1,75	1,76		1,77
				4,21	1,69		1,78		
	Ar livre	6 meses		3,45	1,44		1,62	122,35	
				3,83	1,45	1,45	1,83		1,77
				3,19	1,45		1,86		
		3 meses		6,03	1,33		1,33	111,72	
				4,19	1,31	1,28	1,46		1,43
				3,95	1,20		1,50		
	25% LD>3%	Ar livre		4,09	1,47		1,69	117,28	
			12 meses	4,71	1,52	1,45	1,75		1,70
				3,75	1,35		1,65		
Ar livre		6 meses		3,18	1,35		1,89	131,57	
				3,21	1,42	1,36	1,68		1,79
				3,52	1,30		1,39*		
		3 meses		4,60	1,18		1,53	134,00	
				4,00	1,16	1,17	1,64		1,56
				4,58	1,16		1,52		

Tabela 18 - Valores de RRT para CPs submetidos a 5 ciclos de DUI (conclusão).

Misturas	Envelhecimento	VV (%)	RT (MPa)	RT _{méd} (MPa)	RT _c (MPa)	RT _c _{méd} (MPa)	RRT (%)
100% AN		7,12	1,21		-		56,85
		7,40	1,34	1,24	0,65	0,71	
		7,32	1,17		0,76		
25% LD<3%	Curto Prazo	7,48	1,15		1,05		82,56
		7,45	1,04	1,15	0,92	0,95	
		7,79	1,25		0,87		
25% LD≈3%		7,83	1,26		1,18		84,95
		7,71	1,27	1,24	1,07	1,05	
		7,68	1,19		0,91		
25% LD>3%		7,19	1,41		0,89		67,35
		7,41	1,31	1,31	0,93	0,88	
		6,77	1,20		0,82		
100% AN		6,45	1,72		1,13		56,79
		6,79	1,72	1,77	0,99	1,00	
		7,77	1,86		0,89		
25% LD<3%		7,47	1,52		0,87		62,89
		6,07	1,39	1,46	0,96	0,92	
		-	-		-		
25% LD≈3%	CP Envelhecido	6,73	1,83		1,28		74,80
		7,07	1,35*	1,79	1,17	1,23	
		6,50	1,74		1,23		
25% LD>3%		6,94	1,94		1,19		61,57
		6,32	1,59	1,77	1,19	1,09	
		7,19	1,20*		0,88		

Fonte: Acervo do Autor



Na Figura 51 é perceptível o maior dano nas amostras que ficaram 12 meses envelhecendo ao ar livre, entretanto, não foi possível observar uma correlação com as amostras que sofreram 1 ciclo para as demais misturas e tempo de envelhecimento. A diferença de expansão do agregado siderúrgico utilizado, não apresentou nenhuma tendência de melhora ou piora no dano por umidade para estas amostras analisadas.

Para as amostras envelhecidas em estufa e condicionadas com 5 ciclos de gelo e degelo, é possível verificar que houve um decréscimo da RRT com relação aos resultados obtidos com apenas 1 ciclo, conforme esperado.

Na Figura 52, ao se comparar as amostras com e sem substituição de agregado natural por agregado siderúrgico é perceptível que as amostras com LD apresentaram um maior valor de RRT. Com relação a diferença de expansão do agregado siderúrgico verifica-se mais uma vez que o nível de expansão das escórias não afetou de forma diferenciada o desempenho das misturas.

4.7 EXPANSIBILIDADE DO AGREGADO SIDERÚRGICO

Inicialmente, foi realizado o ensaio de expansibilidade, segunda a norma do DNIT 113/2009 – ME, as três amostras de agregado siderúrgico, LD puro, tiveram expansão de 1,63, 2,31 e 5,92%, Figura 43, caracterizando assim a expansão do agregado.

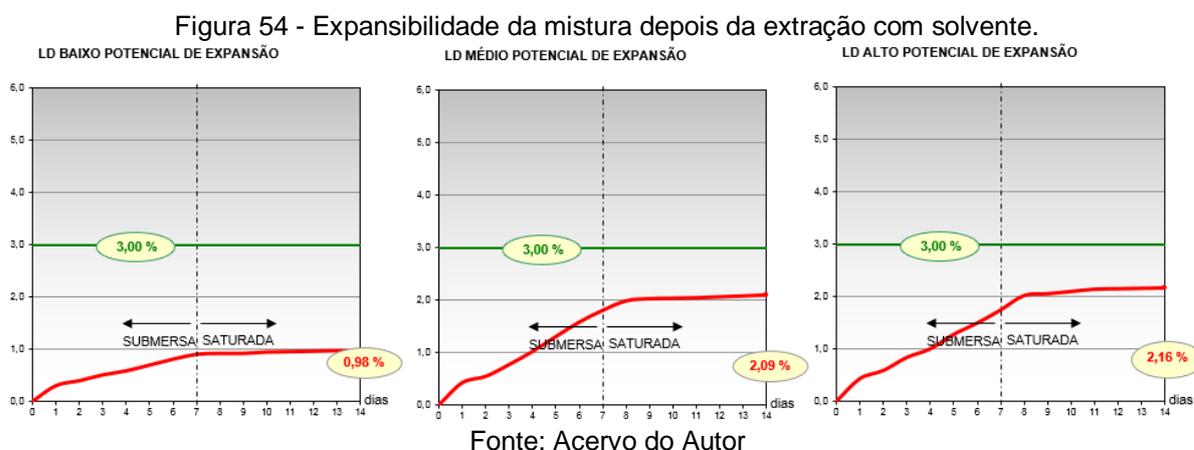
Como as misturas asfálticas estudadas são compostas de 25% de agregado siderúrgico e 75% de agregado natural, foi necessário a realização do ensaio de expansão da mistura, apresentado na Figura 53. Este resultado, corroborou com o esperado, para cada mistura tivemos um novo valor de expansão menor que o do agregado siderúrgico puro e os valores de expansão das misturas, 1,01%, 2,10% e 2,14%, foram aumentando conforme o aumento de expansão do agregado siderúrgico utilizado.

Figura 53 - Expansibilidade da mistura 25% LD e 75% AN



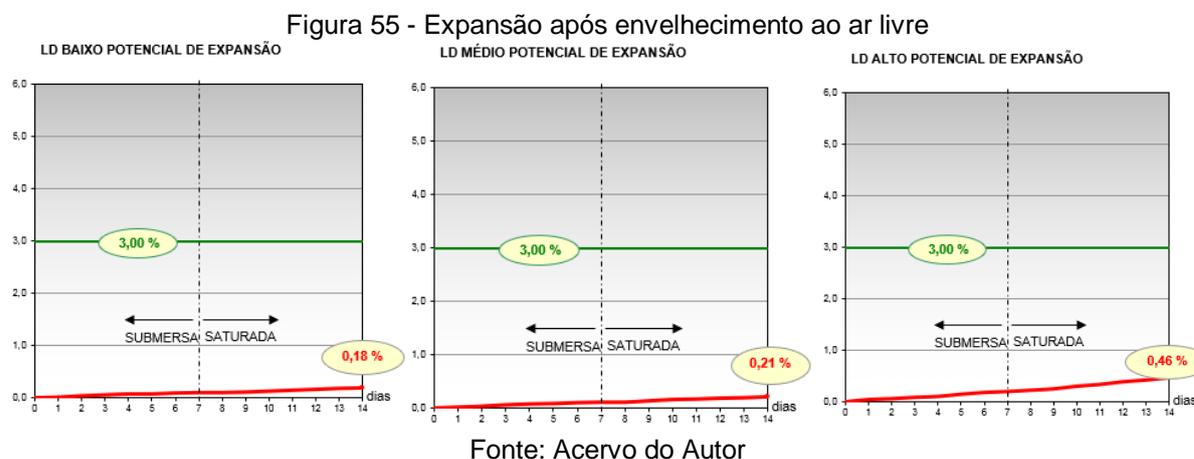
Fonte: Acervo do Autor

De posse dos resultados de expansão das misturas, foi verificado se o solvente utilizado para a extração do material betuminoso, poderia influenciar nos resultados de expansão. Para essa verificação, foi preparada uma mistura asfáltica, e após a extração do ligante, foi realizado o ensaio de expansão apresentando os valores de 0,98%, 2,09% e 2,16% para as misturas 25% LD<3%, 25% LD≈3% e 25% LD>3%, respectivamente. Como é mostrado na Figura 54, verifica-se que o solvente utilizado praticamente não altera o valor da expansibilidade da mistura.



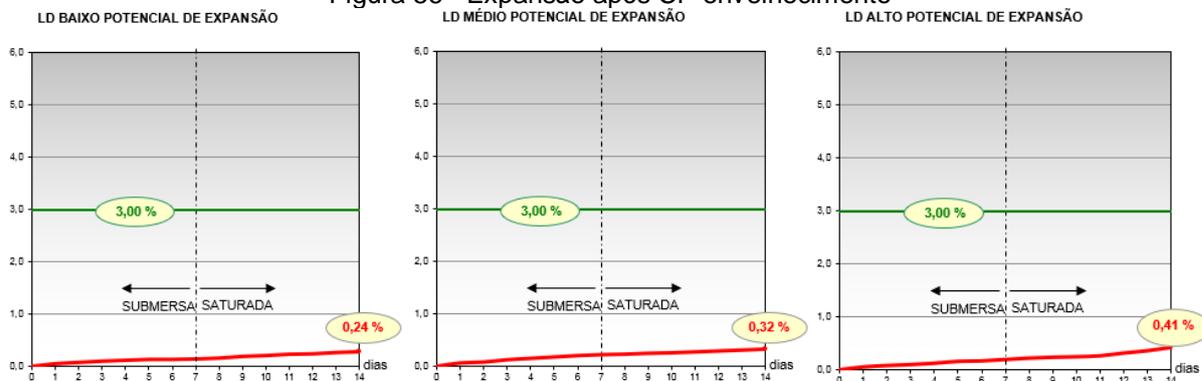
Após a realização do ensaio de DUI, os corpos de provas ensaiados foram separados para a extração do ligante e realização do ensaio de PTM. Os resultados conforme o método de envelhecimento utilizado está apresentado nas Figura 55, 57 e 58.

I. Envelhecimento ao Ar Livre



II. CP Envelhecido

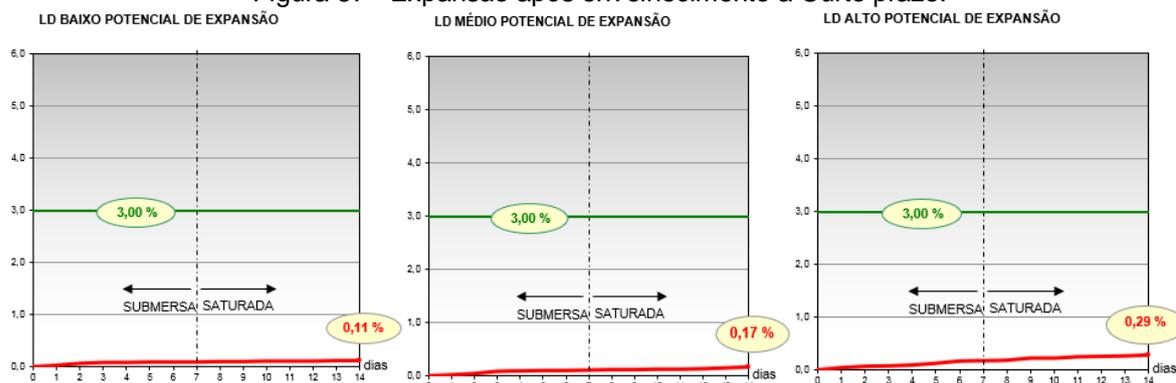
Figura 56 - Expansão após CP envelhecido



Fonte: Acervo do Autor

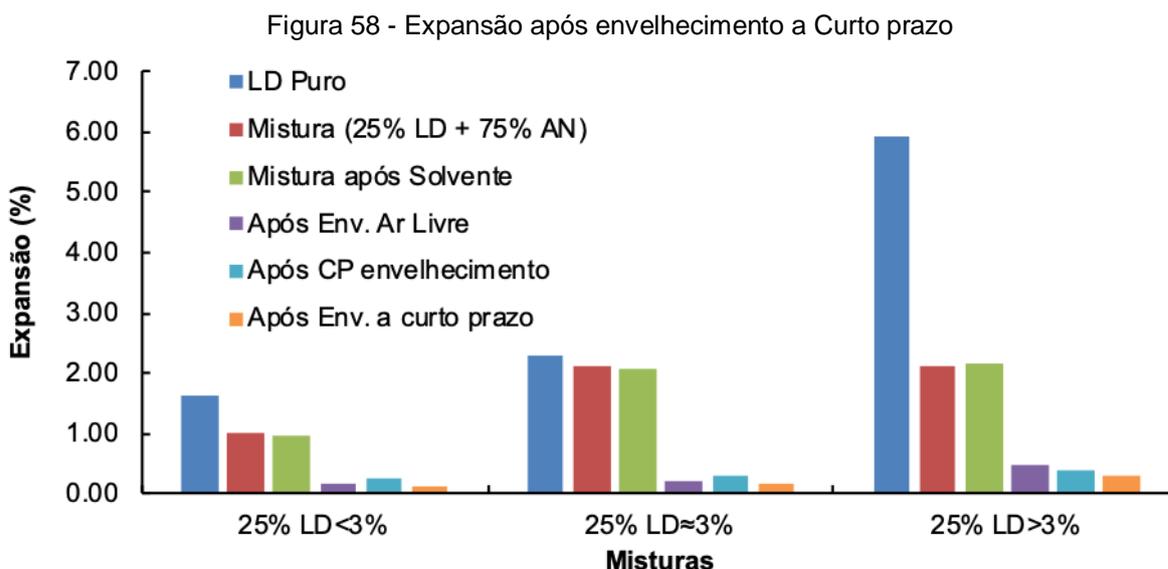
III. Envelhecimento a Curto Prazo

Figura 57 - Expansão após envelhecimento a Curto prazo.



Fonte: Acervo do Autor

A Figura 58, apresenta graficamente o comportamento das expansões das misturas conforme os métodos de envelhecimento utilizados.



Fonte: Acervo do Autor

Analisando os resultados de expansão, é possível verificar que houve uma diminuição dos valores de expansão após as amostras de agregados passarem pelo envelhecimento e condicionamento de DUI. Como os valores de expansão diminuíram, acredita-se que durante o processo de envelhecimento e condicionamento, pode ter havido reações químicas onde fizeram o agregado siderúrgico se estabilizar. Esta estabilização pode ter ocorrido devido a dois motivos individualmente ou combinados:

1 – Hidratação dos CaO e MgO livres, fazendo com que os agregados siderúrgicos presentes se expandissem durante os procedimentos de envelhecimento e DUI;

2 – Reação dos Os CaO e MgO livres, presente no agregado siderúrgico, com o CAP, e, assim, não estariam mais livres para formar o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), e nem o hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), resultando em uma mistura estável em termos de expansão volumétrica além de retardando o envelhecimento do CAP devido às interação entre os compostos químicos dos dois materiais;

Ressalta-se, que isso ocorreu para as misturas em estudo, onde o nível de substituição de AN por LD foi de 25%, porém deve-se atentar que para níveis de substituição maiores que 25%, é necessário fazer uma avaliação desses efeitos no desempenho das misturas asfálticas.

4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com base nos resultados obtidos experimentalmente em laboratório, foram realizados os seguintes tratamentos estatísticos para um grau de confiabilidade de 95%, realizados no programa Statistica:

- ✓ Projeto de experimentos: análise de variância (ANOVA).
- ✓ Comparação múltipla de média.

A fim de ratificar as conclusões sobre a resistência à tração, foram realizadas separadamente o estudo da influência do tipo de mistura (100%AN, 25%LD<3%, 25%LD \cong 3% e 25% LD>3%) e do método de envelhecimento (campo por 12 meses, a curto prazo e a longo prazo) das misturas soltas e compactadas. As Tabelas 19-21 apresentam os resultados obtidos para as análises estatísticas da influência do tipo de mistura e do envelhecimento nos resultados de resistência à tração.

Tabela 19 - ANOVA – influência do tipo de mistura e do envelhecimento na resistência à tração para 25%LD<3%

DADOS ANOVA – SIGNIFICÂNCIA 95%						
Effect	SS	Degr. Of Freedom	MS	F	p	%
Intercept	79,24300	1	79,243	7927,6	0,0000	100,00%
Mistura	0,12760	1	0,1276	12,766	0,00254	99,75%
Envelhecimento	1,31125	3	0,4370	43,726	0,0000	100,00%
mistura* envelhecimento	0,11131	3	0,037	3,712	0,0335	96,64%
Error	0,15993	16	0,0100			

Fonte: acervo do autor

Com os resultados apresentado na Tabela 19, percebe-se que tanto a mistura, quanto o envelhecimento influenciam significativamente no resultado da resistência à tração. Isto significa que há diferenças entre as RT's entre as misturas (independente do método de envelhecimento adotado) bem como houve diferenciação entre as RT's de acordo com o método de envelhecimento. Na análise simultânea da mistura com o envelhecimento (interação de segunda ordem), ocorre uma diminuição desse percentual de influência. Isto implica que o processo de envelhecimento é influenciado pelo tipo de mistura, porém com um menor grau de significância que as variáveis de maneira isolada. Dessa forma, podemos dizer que

o tipo de mistura afeta o envelhecimento, mas não de maneira tão significativa quanto com cada variável isoladamente.

Tabela 20 - ANOVA – influência do tipo de mistura e do envelhecimento na resistência à tração para 25%LD \cong 3%

DADOS ANOVA – SIGNIFICÂNCIA						
Effect	SS	Degr. Of Freedom	MS	F	p	%
Intercept	81,622	1	81,622	7883,0	0,0000	100,00%
Mistura	0,05042	1	0,05042	4,869	0,0422	95,77%
Envelhecimento	1,15068	3	0,38356	37,044	0,0000	100,00%
mistura*envelhecimento	0,20342	3	0,0678	6,549	0,0042	99,57%
Error	0,16567	16	0,0103			

Fonte: acervo do autor

Com os resultados apresentado na Tabela 20, assim como para as misturas 25%LD \cong 3%, tanto a mistura quanto o envelhecimento apresentam influência significativa no resultado da resistência à tração. Porém, observa-se que o grau de significância foi menor para misturas utilizando LD com valores de expansão de aproximadamente 3% (LD \cong 3%) em comparação com misturas utilizando LD com menores valores de expansão (LD<3%). No entanto, os efeitos de segunda ordem para estas misturas foram maiores, o que pode nos indicar uma maior interação dos compostos da mistura afetando o envelhecimento.

Tabela 21 - ANOVA – influência do tipo de mistura e do envelhecimento na resistência à tração para 25%LD>3%

DADOS ANOVA – SIGNIFICÂNCIA						
Effect	SS	Degr. Of Freedom	MS	F	p	%
Intercept	81,585	1	81,58	10398,6	0,000	100%
Mistura	0,0513	1	0,051	6,54	0,021	97,89%
Envelhecimento	1,1428	3	0,380	48,55	0,000	100%
mistura*envelhecimento	0,2080	3	0,069	8,84	0,001	99,89%
Error	0,1255	16	0,007			

Fonte: acervo do autor

Para os resultados apresentado na Tabela 21, percebe-se que tanto a mistura quanto o envelhecimento influenciam significativamente no resultado da resistência à tração. Na análise simultânea da mistura com o envelhecimento, é encontrado um valor mediano entre os resultados separadamente.

De uma forma geral, é possível concluir, que em todos os casos tanto a mistura, quanto o envelhecimento influenciam diretamente na resistência à tração de forma isolada. É possível afirmar também, que quanto maior o nível de expansão, maior o grau de significância nos efeitos de segunda ordem entre o tipo de mistura e o procedimento de envelhecimento.

Paralelamente a esta análise, torna-se necessário avaliar se os resultados encontrados para a resistência à tração em cada caso podem ser considerados estatisticamente iguais ou diferentes. Dessa forma, utilizando a comparação múltipla de média chega-se aos resultados das Tabela 22, 23 e 24.

Tabela 22 - Comparação múltipla de médias da resistência à tração para 25%LD<3%

COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS						
MISTURA	ENVELHECIMENTO	RT MEAN	1	2	3	4
25%LD <3%	CURTO PRAZO	1,553	****			
100%AN	CAMPO	1,580	****			
25%LD <3%	CAMPO	1,600	****	****		
100%AN	CURTO PRAZO	1,623	****	****		
25%LD <3%	LONGO PRAZO COMPAC.	1,877		****	****	
25%LD <3%	LONGO PRAZO SOLTA	1,947			****	
100%AN	LONGO PRAZO COMPAC.	2,067			****	****
100%AN	LONGO PRAZO SOLTA	2,290				****

Fonte: acervo do autor

A análise estatística é feita de forma que os resultados estatisticamente iguais são colocados no mesmo grupo. Observa-se que o resultado aponta a existência de 4 grupos. Do grupo 1 é possível observar que o valor da RT das misturas com 100% de agregado natural envelhecidas por 12 meses é estatisticamente igual à RT das misturas com 25% de LD<3%, sob as mesmas condições. Isto evidencia a

possibilidade de substituição do agregado natural por escória LD<3%. Do grupo 2, o resultado mais relevante, é que a RT da mistura 25%LD<3% de campo igual à da mistura 25%LD<3% envelhecido a longo prazo compactado, o que indica que o grau de envelhecimento encontrado em 12 meses em campo seria similar ao encontrado simulando envelhecimento após 8 anos, nas condições de laboratório. Do grupo 3, é possível extrair dois resultados diferentes: o primeiro, é que a longo prazo não há diferença estatística entre os valores de RT se a mistura 25%LD<3% foi envelhecida em estado solto ou compactado; o segundo resultado, é que a RT da mistura 25%LD<3% a longo prazo RT que o agregado natural compactado. Por fim, do grupo 4, mostra que não há diferença entre agregado natural compactado e solto no que tange à resistência à tração a longo prazo, mas uma vez evidenciando que os métodos de envelhecimento a longo prazo geram resultados estatisticamente semelhantes.

Tabela 23 - Comparação múltipla de médias da resistência à tração para LD \cong 3%

COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS						
MISTURA	ENVELHECIMENTO	RT MEAN	1	2	3	4
25%LD \cong 3	CURTO PRAZO	1,570	****			
100% AN	CAMPO	1,580	****			
100% AN	CURTO PRAZO	1,623	****			
25%LD \cong 3	CAMPO	1,750	****	****		
25%LD \cong 3	LONGO PRAZO COMPAC.	1,927		****	****	
25%LD \cong 3	LONGO PRAZO SOLTA	1,947		****	****	
100% AN	LONGO PRAZO COMPAC.	2,067			****	****
100% AN	LONGO PRAZO SOLTA	2,290				****

Fonte: acervo do autor

Tabela 24 -Comparação múltipla de médias da resistência à tração para LD>3%

COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS						
MISTURA	ENVELHECIMENTO	RT MEAN	1	2	3	4
25%LD >3	CURTO PRAZO	1,570	****			
100% AN	CAMPO	1,580	****			
100% AN	CURTO PRAZO	1,623	****			
25%LD >3	CAMPO	1,750	****	****		
25%LD >3	LONGO PRAZO COMPAC.	1,930		****	****	
25%LD >3	LONGO PRAZO SOLTA	1,940		****	****	
100% AN	LONGO PRAZO COMPAC.	2,067			****	****
100% AN	LONGO PRAZO SOLTA	2,290				****

Fonte: acervo do autor

Observando os resultados das Tabelas 23, e 24, é possível notar que as mesmas conclusões são obtidas comparando as misturas com 25%LD e 100%AN (independente do nível de expansão da LD comparado) e os métodos de compactação. Mais uma vez, o tipo de mistura não alterou significativamente as RT's, indicando que não houve diferença ao se substituir o NA por LD nem mesmo houve influência do nível de expansão. Também é possível concluir que os dois processos de envelhecimento em laboratório resultaram em RT's estatisticamente semelhantes.

4.8.1 Análise estatística da influência da expansão na RT das misturas:

Também foi feita a análise estatística ANOVA (grau de confiabilidade de 95%) dos valores de RT considerando apenas as misturas que utilizaram 25% de LD em sua composição. Dessa forma, utilizando a comparação múltipla de média chega-se aos resultados da Tabela 25.

Tabela 25 - Comparação múltipla de médias

MISTURA	ENVELHECIMENTO	RT MEAN	1	2	3
25% LD >3%	CAMPO	1,446667		****	
25% LD <3%	CURTO PRAZO.	1,553333		****	****
25% LD =3%	CURTO PRAZO.	1,570000		****	****
25% LD >3%	CURTO PRAZO.	1,593333		****	****
25% LD <3%	CAMPO	1,600000		****	****
25% LD =3%	CAMPO	1,750000	****		****
25% LD <3%	LONGO PRAZO COMPAC.	1,876667	****		
25% LD =3%	LONGO PRAZO COMPAC.	1,926667	****		
25% LD >3%	LONGO PRAZO COMPAC.	1,930000	****		
25% LD >3%	LONGO PRAZO SOLTA	1,940000	****		
25% LD =3%	LONGO PRAZO SOLTA	1,946667	****		
25% LD <3%	LONGO PRAZO SOLTA	1,946667	****		

Fonte: acervo do autor

Do grupo 1, é possível concluir que estatisticamente não há diferença de RT das misturas em diferentes níveis de expansão a longo prazo. Assim como é possível dizer que os métodos de envelhecimento de laboratório a longo prazo são estatisticamente semelhantes. Do grupo 2 é possível concluir que o método de envelhecimento do campo não é tão significativo que o envelhecimento a longo prazo, uma vez que tanto a RT da mistura 25%LD>3% quanto a RT da mistura 25%LD<3% são equiparados ao envelhecimento de curto prazo em todos os níveis de expansão. Da mesma forma, analisando o grupo 3 é possível equiparar também o envelhecimento do campo da 25%LD=3% ao envelhecimento de curto prazo.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de misturas asfálticas a longo prazo, produzidas com incorporação de escória de aciaria LD, em diferentes níveis de expansão. Para isso, buscou-se analisar através de diferentes métodos de envelhecimento, misturas asfálticas com e sem substituição parcial do agregado natural por agregado siderúrgico, a fim de verificar como o agregado siderúrgico se comporta durante o envelhecimento comparado com o agregado natural e estudar alguns processos de envelhecimentos de misturas asfálticas. Além disso, as misturas foram submetidas ao dano por umidade induzida para acelerar os efeitos expansivos decorrentes da ação do calor e umidade. Diante dos resultados de caracterização e demais ensaios realizados neste trabalho, é possível concluir que:

- A resistência à abrasão da LD apresentou um desgaste expressivamente menor que o do agregado natural, evidenciando dessa forma a maior resistência do agregado siderúrgico com relação ao agregado natural.
- A absorção da LD apresentou valores maiores que o agregado natural. Esta diferença pode levar a um maior consumo de ligante para misturas produzidas com escória. No entanto, para o percentual de substituição estudado, não houve alteração nos parâmetros volumétricos das misturas, sendo independente do nível de expansão da escória LD.
- Com relação ao desempenho mecânico avaliado, a resistência à tração das misturas envelhecidas a curto prazo, não foi encontrada diferença significativa na resistência à tração com escória em diferentes níveis de expansão.
- Com relação ao desempenho mecânico avaliado pela resistência à tração das misturas envelhecidas a longo prazo em laboratório, não foi observado diferença significativa entre os dois métodos de envelhecimento empregados.
- Com relação as misturas envelhecidas a longo prazo, não houve diferença significativa na resistência à tração de misturas produzidas com escória em diferentes níveis de expansão.
- Analisando a altura dos corpos de provas ensaiados, é possível verificar que não houve variação significativa da altura, visto que, a variação ao longo de um ano foi menor que 0,15 milímetros, para todas as misturas ensaiadas.

- Para as amostras envelhecidas em laboratório, é possível verificar que os valores de RRT foram menores que 100% porém todos ficaram acima do limite de 70%, podendo ser observado que as amostras com substituição do agregado natural por coproduto LD, apresentaram valores maiores que a amostra com 100% de agregado natural, indicando a melhor adesão do agregado siderúrgico em comparação ao agregado natural.

- Para as amostras envelhecidas em estufa e condicionada a 5 ciclos, onde o dano é mais severo, algumas amostras não atenderam o mínimo de 70% de RRT, como é o caso da amostra de 100 % de agregado natural e a amostra de LD com expansão maior de 3%, envelhecidas a curto prazo. Porém, a norma exige o limite de 70% de RRT para 1 ciclos, não especificando para maiores ciclos, todas as demais atingiram o limite mínimo de 70% de RRT.

- As amostras com substituição de agregado natural por agregado siderúrgico apresentaram um maior valor de RRT. Com relação a diferença de expansão do agregado siderúrgico verifica-se mais uma vez que o nível de expansão das escórias não afetou de forma diferenciada o desempenho das misturas.

- Com relação a variação da expansão dos agregados após os procedimentos de condicionamento, observou-se uma redução dos efeitos expansivos. Considera-se aqui que pode ter havido hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres ou interação destes óxidos com os compostos do CAP tornando a mistura estável. Ressalta-se que estas hipóteses precisam ser verificadas com outros ensaios.

- De uma maneira geral, não se observou diferença estatisticamente significativa entre os valores de resistência encontrados, mostrando a viabilidade de substituição de agregado natural por 25% de escória LD para produção de misturas asfálticas. Verifica-se também que para esse percentual de substituição, os efeitos expansivos são insignificantes. No entanto, é preciso avaliar estes efeitos para maiores percentuais de substituição.

5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Diante do estudo realizado e seus resultados, sugerem-se as seguintes pesquisas futuras:

- Avaliar maiores percentuais de substituição, visto que, neste trabalho verificou-se que há expansão dos agregados siderúrgicos devido à ação do calor e umidade em que as misturas são submetidas ao longo do tempo;
- Avaliação em campo por meio de trecho experimental para acompanhar o processo de envelhecimento natural das misturas, contendo escória de aciaria LD submetendo a condições reais de tráfego e ambientais e verificar os efeitos expansivos destes coprodutos;
- Avaliar a microestrutura de agregados siderúrgicos extraídos de misturas asfálticas (ou de campo) após serem submetidos à ação de calor e umidade, para inferir sobre mudanças nas características destes que podem afetar o desempenho das misturas;
- Avaliar diferentes tempos de envelhecimentos para se possível montar uma curva de como o envelhecimento afeta as misturas no decorrer de anos.

6 REFERÊNCIAS

AASHTO T-62, American Association of State Highway and Transportation Officials, **Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)**, 2007.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6458. **Grãos de pedregulhos retinos na peneira de 4,8 mm determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7181. **Análise Granulométrica**, 2016.

AIREY, G. **Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens**, Fuel, v. 82, p.1709-1719, 2003.

AMELIAN, S.; MANIAN, M.; ABTAHI, S. M.; GOLI, A. **Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag**. Journal of Cleaner Production (2018).

APEAGYEI, A. K.; GRENFELL, J. R. A.; AIREY, G. D. Moisture-induced strength degradation of aggregate – asphalt mastic bonds. **Journal Road Materials and Pavement Design**, p. 37–41, 2014.

ARAÚJO, M. F. A. **Efeito da Radiação Solar no Envelhecimento do Concreto Betuminoso Usinado a Quente**. Dissertação de Mestrado, UFOP: Ouro Preto, 2007.

AREGA, Z. A., BHASIN, A., & DE KESEL, T. **Influence of extended aging on the properties of asphalt composites produced using hot and warm mix methods**. **Construction and Building Materials**, 44, 168–174, (2013).

ASTH, H. G. **Desenvolvimento de escórias de refino secundário para o forno panela da v&m do brasil**. Minas Gerais: Universidade Federal De Minas Gerais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Dissertação de Mestrado, 2011.

BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U.; KIGGUNDU, B. M. (2005) **Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures**. **Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures**. International Journal of Pavement Engineering, p. 229–239, 2005.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do Fator de Expansão de uma Escória de Aciaria em Diferentes Processos de Cura para Uso em Pavimentação**. 93 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais. 2001.

BELL, C.A.; ABWAHAB Y.; CRISTI M.E. e SOSNOVSKE D. **Selection of Laboratory Aging Procedure for Asphalt-Aggregate Mixtures**. SHRP-A-383, National Research Council: Washington, 1994.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras & ABEDA, 2007.

BRANCO, V. T. F. C. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. 153f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

CALA, A.; CARO, S.; LLERAS, M.; ROJAS-AGRAMONTE, Y. Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 661–672, 2019a.

CALA, A.; CARO, S.; LLERAS, M.; ROJAS-AGRAMONTE, Y. Understanding the role of the chemical composition of aggregates on the moisture susceptibility of asphalt mixtures. **Transportation Research Board**, p. 1–7, 2019b

CHEN, J.; WEI, S. **Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag**. *Construction and Building Materials* (2016)

Confederação Nacional do Transporte CNT. **Por que os pavimentos do Brasil não duram**. 2018. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/conheca-principais-defeitos-pavimento>>. Acesso em: 23 jul. 2018.

DNER-ME 043/95 – **Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall**; Norma rodoviária – Método de Ensaio.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. Publicação IPR – 179. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transporte, Instituto de pesquisas rodoviárias, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes 031/2006 - ES DNIT **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico** – Especificação de serviço. Origem: Revisão da norma DNIT 031/2004, ES.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes 136/2010 ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes 136/2017 – ME, **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**: Revisão da norma DNER 136/2010.

ELWARDANY, M. D., RAD, F. Y., CASTORENA C. & KIM, Y. R. **Evaluation of asphalt mixture laboratory long-term ageing methods for performance testing and prediction**, *Road Materials and Pavement Design*, (2017)

GATCHALIAN, D., MASAD, E., CHOWDHURY, A., & LITTLE, D. (2006). Part 2: **Nonbituminous components of bituminous paving mixtures: Characterization of aggregate resistance to degradation in stone matrix asphalt mixtures.** Journal of the Transportation Research Board,

GEISELER, J. **Use of steel works slag in Europe.** Alemanha: Waste Management. Vol 16. pp 59-63, 1996.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld.** Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 157 f, 2003.

GONÇALVES, R. M. **Incorporação de Coprodutos de Aciaria KR e Polímeros PDC em Solos para Base de Pavimentos.** 117 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2016.

GONÇALVES, W. M. **Adequação do Processo de Fabricação de Aço LD, Utilizando Ferro-Gusa Líquido Com Baixo Teor De Silício.** 87p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) 2005. (Dissertação de Mestrado).

HARRIGAN, E. T. (2007). **Simulating the effects of hot mix asphalt aging for performance testing and pavement structural design** (Report, National Cooperative Highway Research Program, Research Results Digest 324). Washington, DC: National Research Council.

HOUSTON, W. M., MIRZA, M.W., ZAPATA, C. E., & RAGHAVENDRA, S. (2005). **Environmental effects in pavement mix and structural design systems** (Report, National Cooperative Highway Research Program, No. Project 9-23 Washington, DC: National Research Council.

HUANG, L.; LIN, D.; LUO, H.; LIN, P. **Effect of field compaction mode on asphalt mixture concrete with basic oxygen furnace slag.** Construction and Building Materials (2012)

IBS (2016) - Instituto Brasileiro de Siderurgia. **Relatório de Sustentabilidade.** Página da internet: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 30/05/2018, Rio de Janeiro, Brasil.

INSTITUTO AÇO BRASIL, RELATÓRIOS DE SUSTENTABILIDADE – IABR – Setor do Aço no Brasil – Produtos e Mercado. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/relatorios.asp>> Acesso em: dezembro de 2018.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA (Brasil). **Estimativa dos Custos dos Acidentes de Trânsito no Brasil com Base na Atualização Simplificada das Pesquisas Anteriores do Ipea,** Brasília, 2015.

JÚNIOR, J. L. O. L., **Influência da adesividade agregado-ligante no trincamento por fadiga de misturas asfálticas,** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2018.

KANDHAL, P. S. e HOFFMAN, G. L., 1997, "Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in Hot-Mix Asphalt Mixtures", **Transportation Research Record**, n. 1583, pp.28-36.

KIM, K.; HAENG JO, S.; KIM, N.; KIM, H. **Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage.** Construction and Building Materials (2018)

LEITE, L.M.; ODA, S.; NASCIMENTO, L.H.; CHACUR, M.; MOTTA, L.M.G. **Estudo do Envelhecimento do Cimento Asfáltico de Petróleo:** Efeito dos Parâmetros de Dosagem da Mistura Asfáltica. In: XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Salvador, 2010.

LOBATO, N. C. C. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Indústria Siderúrgica** 156 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2014.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** São Paulo: Universidade de São Paulo. Escola politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Dissertação de Mestrado, 2000.

MOLLENHAUER, K., & MOUILLET, V. **Re-road – End of life strategies of asphalt pavements.** European Commission DG Research. (2011).

MORILHA JUNIO, A., **Estudo Sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas.** 117 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

MOURA, B. L. R.(2020) **Avaliação da adesividade ligante-escória sob aspectos físicos, químicos e termodinâmicos e correlação com desempenho mecânico de misturas asfálticas contendo diferentes fíleres melhoradores de adesividade.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) 2020.

NASCIMENTO FILHO, V. **Técnicas Analíticas de Fluorescência de Raios-X por dispersão de eenergia (EDXRF) e por reflexão total (TXRF),** 1999.

OLIVEIRA, A. H. **Avaliação do Potencial do Líquido da Castanha de Caju (LCC) como Retardante de Envelhecimento para Materiais Asfálticos.** 145 f Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2014

PARENTE, E. B. et al. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Solo e Escória de Aciaria para Aplicação na Construção Rodoviária na Região Metropolitana de Fortaleza.** Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003

PARTL, M. N.; BAHIA, H. U.; CANESTRARI, F.; DE LA ROCHE, C.; DI BENEDETTO, H.; PIBER, H.; SYBILSKI, D. (Eds.). **Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials.** Report STAR 206-ATB. Unedited Version of State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB, p. 417, 2012.

PING, W. V.; XIAO, Y. **Evaluation of the dynamic complex modulus test and indirect diametral test for implementing the AASHTO 2002 design guide for pavement structures in Florida.** Tallahassee, 2007.

PINHEIRO NETO, J. C.; OLIVEIRA, F. H. L.; AGUIAR, M. F.P. **Revisão de estudos sobre a aplicação de escória de aciaria na pavimentação rodoviária.** 44ª RAPV – Reunião Anual de Pavimentação e 18º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Foz do Iguaçu, PR – Agosto de 2015

POLESE, M. O. **Estudo da Expansibilidade e da Microestrutura de Escórias de Aciaria LD e EAF.** 295 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2007

QUEIROZ, A.; KUROSAWA, R.; BARRETO, R. **Difração de Raios X.** Laboratório Avançado de Física Computacional. Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2013.

REED, J. **Evaluation of the effects of aging on asphalt rubber pavements** (Ph.D. dissertation). Arizona State University, Phoenix.(2010)

RODRIGUES, G. L. C. **Caracterização e Avaliação da Expansibilidade de Escórias de Aciaria LD Não Tratadas e Tratadas.** 171 f Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2007

SCHUMACHER, A. G. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados siderúrgicos nas características do material e no desempenho de misturas asfálticas.** 94 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2018.

SILVA, E. A. da, MENDONÇA, R., L. de, DOBELE, C., H., M. et al., 2003, “Uma Experiência Inédita: Uso da Escória de Aciaria LD em Todas as Camadas do Pavimento”. **34º Reunião Anual de Pavimentação**, nº 1.15, Campinas, SP, Agosto.

SILVA, E.A., 1994, “**Uso de escória de aciaria em pavimentação viária**”. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, v. 1, p. 261-283

TAVARES, D. S.; ODA, S; MOTTA, L. M. G. **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em pavimentação asfáltica.** COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ilha do Fundão – RJ, 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Biblioteca Central. **Normalização e apresentação de trabalhos científicos e acadêmicos**, Biblioteca Central. - 2. ed. - Vitória, ES: EDUFES, 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Biblioteca Central. **Normalização de referências: NBR 6023:2002**, Biblioteca Central. - Vitória, ES: EDUFES, 2015.

VAN DEN BERGH, W. **The effect of aging on fatigue and healing properties of bituminous mortars** (Ph.D. Dissertation). Delft University of Technology, Delft, 2011

VAZ, G. D. **Quantificação das perdas de ferro metálico em escórias de forno elétrico a arco**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro, pós-graduação em engenharia de materiais e de processos químicos metalúrgicos Dissertação de mestrado, 2001.

WU, S.; XIAO, Y.; LIU, Q.; YANG, C.; XIE, J.; NIE, S.; ZHANG, L. **Material characterization and performance evaluation of asphalt mixture Incorporating basic oxygen furnace slag (BOF) sludge**. Construction and Building Materials, (2017)

XIE, J.; CHEN, J.; WU, S.; LIN, J.; WEI, W. **Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag**. Construction and Building Materials, (2013)

ZHANG, J.; APEAGYEI, A. K.; AIREY, G. D.; GRENFELL, J. R. A. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 62, p. 45–54, 2015.

ZIAEE, S. A.; KAVUSSI, A.; QAZIZADEH, M. J.; MORGHADAM, A. M. (2015) **Evaluation of Long Term Ageing of Asphalt Mixtures Containing EAF and BOF Steel Slags**. International Journal of Transportation Engineering, Vol.2, N°.3, Winter 2015.