

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

Sidineidy Izoton

Jamilla Lutif

Patrício José Moreira Pires

Aécio Guilherme Schumacher

Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal do Espírito Santo

RESUMO

Neste trabalho amostras de escória do tipo Linz-Donawitz (LD) com diferentes valores de expansão (1,63%, 2,31% e 5,92%) foram submetidos à caracterização física e mecânica, para avaliar os efeitos da expansão das propriedades individuais do material. Além disso, a escória LD foi utilizada como agregado para verificar os efeitos de suas características de expansão no desempenho mecânico de misturas asfálticas a longo prazo. Foram avaliados quatro diferentes tipos de misturas asfálticas densas, sendo uma referência (sem escória LD) e outras três misturas com substituição de agregado natural por 25% de escória LD com diferentes níveis de expansão. As misturas foram submetidas a dois processos de envelhecimento a longo prazo (mistura solta e corpo-de-prova compactado), além de também serem submetidas a envelhecimento a curto prazo (2 horas em estufa) e, subsequentemente, avaliadas mecanicamente através do ensaio de resistência a tração por compressão diametral. Os métodos de envelhecimento utilizados simulam um envelhecimento a longo prazo das misturas asfálticas por 8 anos considerando uma película de 20 milímetros de revestimento de acordo com literatura consultada. Foi constatado que o nível de expansão da escória altera algumas propriedades individuais do agregado siderúrgico, o que poderia interferir em parâmetros volumétricos das misturas asfálticas. De acordo com os resultados, a longo prazo os diferentes níveis de expansão da escória LD não interferiram significativamente na resistência a tração das misturas asfálticas estudadas.

Palavras-chave: escória LD, envelhecimento, expansão.

ABSTRACT

In this work, samples of Linz-Donawitz (LD) type with different values of expansion (1.63%, 2.31% and 5.92%) were submitted to the physical and mechanical characterization to evaluate the effects of the expansion of properties of the material. LD slag was used as an aggregate to verify the effects of its expansion characteristics on the long-term mechanical performance of asphalt mixtures. Four different types of dense asphalt mixtures were evaluated, one reference (without LD slag) and three others with replacement of natural aggregate by 25% LD slag with different levels of expansion. The mixtures were submitted to two long-term aging processes (loose mix and compacted specimen), as well as being subjected to short-term aging (2 hours in a greenhouse), and latter to mechanical evaluation using indirect tensile strength test. The aging methods used herein simulate the long-term aging of the asphalt mixtures for 8 years considering a 20 millimeters coating film according to the literature consulted. It was found that the level of slag expansion changes some individual properties, which could interfere in the asphalt mixture volumetric parameters. Based on the results, the different levels of LD slag expansion did not significantly interfere in the long-term tensile strength of the studied asphalt mixtures.

Key words: LD slag, aging, expansion.

1. INTRODUÇÃO

Na procura por novos materiais encontra-se a utilização de resíduos gerados 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, 2019). Muitas pesquisas são realizadas utilizando a escória de aciaria LD (Linz Donawitz), demonstrando a viabilidade técnica desse para uso como agregados em misturas asfálticas (Teixeira *et al.*, 2019; Kim, 2018; Groenniger

et al., 2017). No entanto, muitos estudos foram realizados e comprovam seu bom desempenho a curto prazo, porém ainda não está claro o seu efeito e desempenho a longo prazo.

Esse coproduto é de natureza expansiva, com variações de volume de até 10%, devido à hidratação de compostos químicos como os óxidos de cálcio e magnésio presentes na composição da escória de aciaria (Beshears, 2013). Este comportamento, quando acionado em pavimentos asfálticos, resulta em tensões internas que podem causar fissuras prematuras e erupções localizadas na camada superficial do pavimento. Para acelerar as características expansivas da escória de aciaria LD, os fabricantes de aço realizam um processo de cura extenso lavando a escória em grandes áreas abertas. Em geral, isso pode levar de seis meses a um ano para atingir os níveis aceitáveis de expansão exigidos em muitos procedimentos padrão para aplicação em rodovias (Beshears, 2013). A norma brasileira limita o valor máximo de expansão da escória de aço a 3% para aplicações de pavimentação, de acordo com a especificação DNER - EM 262/94, baseada no PTM 130/78. Mais recentemente, o Departamento de Transporte da Pensilvânia especificou que a expansão máxima deveria ser limitada a 0,50%. Além disso, a Norma Americana ASTM D 2940 / D2940M também estabelece o limite máximo de expansão de 0,50% para a escória de aço usada como agregado em camadas de base e sub-base de rodovias e aeroportos.

Embora existam vários trabalhos sobre a avaliação da escória de aciaria como agregados, e seus resultados mostraram um melhor desempenho das misturas asfálticas contendo escória de aço, os efeitos da natureza expansiva deste material a longo prazo não foram claramente verificados. Julga-se com base em casos de insucesso, que este material, devido a sua natureza expansiva, resulte em tensões internas que levam ao trincamento precoce do pavimento como descritos nos trabalhos de Tavares *et al* 2011, e Pinheiro Neto *et al* 2018.

O nível de expansão pode afetar as propriedades da escória de aço como agregado e é importante identificar as características mais afetadas devido à expansão deste coproduto. As características dos agregados, como graduação, módulo, forma e textura da superfície, e as propriedades do cimento asfáltico, influenciam as propriedades mecânicas da mistura. Assim, é importante entender as variáveis que podem afetar a interação entre agregados e cimento asfáltico em uma mistura para permitir a geração das propriedades mecânicas desejadas (Qazizadeh, 2018). É possível que o potencial expansivo da escória de aço possa ser minimizado pelo filme de cimento asfáltico, o que pode impermeabilizar o material e, assim, minimizar os efeitos do processo de hidratação. Shen *et al.* (2009) propuseram que o revestimento de escória LD por aglutinante de asfalto poderia impedir a hidratação do cálcio e óxido de magnésio, e esse efeito pode resultar em um aumento na estabilidade volumétrica da mistura asfáltica com escória LD.

A curto prazo, Teixeira *et al.* (2019) 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 igual ou superior aqueles encontrados para misturas asfálticas preparadas integralmente com agregado natural. Também foi verificado 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 407/2017 par uso em pavimentação. Porém, os autores não realizaram estudo de efeitos da expansão no desempenho de misturas asfálticas a longo prazo.

Na literatura é possível notar uma carência nas referências bibliográficas quando se trata do envelhecimento de misturas asfálticas utilizando escória de aciaria como agregado, possivelmente devido as pesquisas estarem concentradas no CAP, uma vez que este é o material mais oneroso das obras de pavimentação, e o material que mais sofre com o processo de envelhecimento. As misturas asfálticas são envelhecidas na maioria das vezes por exposição da mistura aos raios ultravioletas (UV) em câmara 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, porem 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).

Dessa forma, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com substituição parcial de agregado natural por escória de aciaria e envelhecidas segundo diversas metodologias (soltas e compactadas, em estufa e ao ar livre).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram Agregados Naturais granítico (AN), brita 1, brita 0, granilha e pó de pedra comumente empregados em obras rodoviárias da região e os agregados siderúrgicos foram do tipo LD provenientes de siderúrgica local em diferentes níveis de expansão, com a finalidade de avaliar se existe um comportamento diferente para níveis de expansão distintos deste agregado siderúrgico. Os níveis de expansão dos coprodutos utilizados para a pesquisa foram de 1,63%, 2,31% e 5,92%, apurados pelo ensaio de potencial de expansão DNIT-ME 113/2009,

O Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP utilizado para a pesquisa é proveniente da refinaria Petrobras/REDUC. O CAP foi fornecido pela empresa Único Asfalto, suas características estão apresentadas na ficha técnica fornecida pela refinaria na Tabela 1.

Tabela 1: 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 m
Ponto de amolecimento	D36	46 min	49,8	graus °C
Viscosidade Brookfield 135 GC-SP21 20RPM	D4402	274 min	302	cp
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21	D4402	112 min	154	cp
Viscosidade Brookfield a 177 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	graus °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	graus °C
Índice de suscetibilidade térmica	X018	-1,5 a 0,7	-1	N/A
Densidade relativa a 20/4 Graus celsius	D70	Anotar (1)	1,01	N/A
Aquecimento a 177 °C	X215	NESP (2)	NESP	N/A

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

2.2 Métodos

A fim de atingir os objetivos, este estudo foi conduzido em duas etapas, sendo a primeira a caracterização de escórias com diferentes níveis de expansão bem como do agregado natural para verificar as diferenças nas propriedades dos agregados. Foram executados a caracterização dos materiais seguindo as normas NBR 7181/1984, para os ensaios de análise granulométrica, NBR 6458/1984, para os ensaios de massa específica e absorção, DNER-ME 152/1995, para os ensaios de massa unitária, NBR NM 51/2001, para os ensaios de abrasão Los Angeles, DNER-ME 054/1997, para os ensaio de equivalente de areia, ASTM C88-1976, para os ensaios de Durabilidade ao sulfato de sódio, DNER-ME 078/1994, para os ensaios de adesividade, DNIT-ME 113/2009, para os ensaio de potencial de expansão.

Para produção das misturas asfálticas, utilizou-se os resultados de dosagem encontrados por Teixeira *et al.* (2019), uma vez que foram utilizados os mesmos agregados e proporções de materiais. Os autores adotaram a faixa C do DNIT, utilizando as frações dos materiais descritos na Tabela 2, enquadrando assim os agregados utilizados entre os limites exigidos para essa faixa. O teor de ligante foi determinado de acordo com a metodologia Marshall de dosagem, sendo encontrado o valor de 5,14 %. Foi utilizado 25% de escória LD e 75% de agregados naturais, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Composição das misturas utilizadas

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

A Figura 1 representa a curva granulométrica das misturas em comparação com os limites da faixa C do DNIT

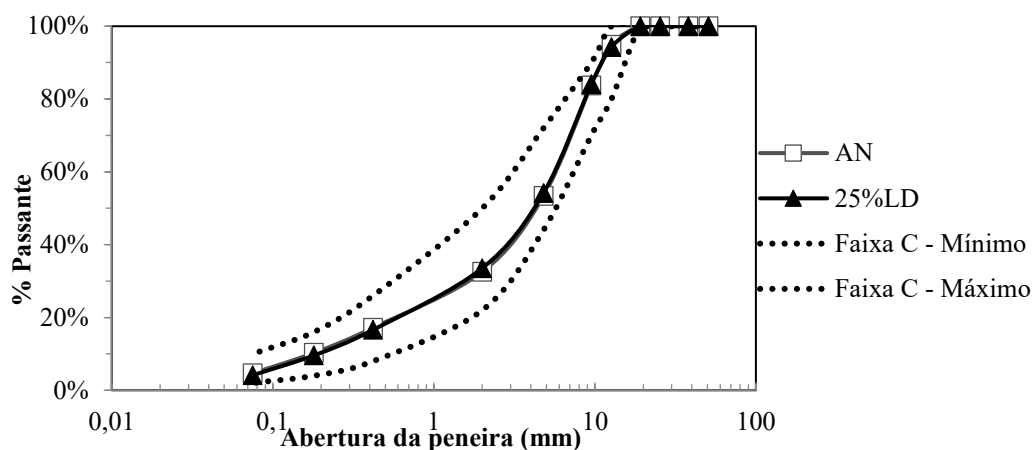


Figura 1: Curva granulométrica das misturas utilizadas, e limites da faixa C do DNIT

Após a caracterização dos materiais utilizados realizou-se a moldagem de corpos de provas seguindo a norma do DNER 043/95 – ME. Para realizar uma comparação entre os resultados de resistência a tração, norma DNIT 136/2017 – ME, dos corpos de provas moldados sem envelhecimento a longo prazo e com envelhecimento a longo prazo para misturas distintas. Foram ensaiados três CP's por mistura e por ensaio realizado, sendo apresentado o valor médio.

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 4), simulando um período de envelhecimento de 8 anos. 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.

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 preparação dos corpos de prova, os mesmos foram colocados em estufa por um período de 9 dias à 95 °C (Figura 5), para somente após esse período serem submetidos a ensaio de resistência a tração por compressão diametral.



Figura 2: a) Envelhecimento de mistura solta em estufa, b) Envelhecimento de corpos de prova compactados.

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 3. 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 se assemelha ao da Florida, foi escolhido este tempo e temperatura para o processo de envelhecimento das misturas estudadas em laboratório.

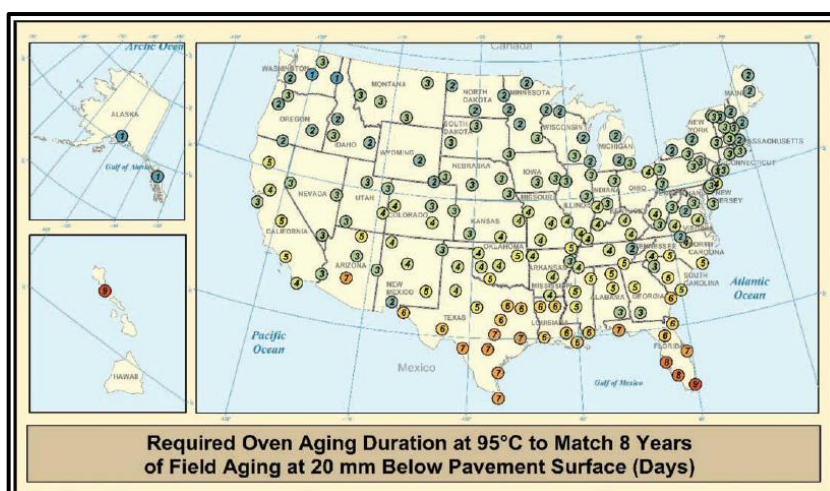


Figura 3: Mapa ilustrando o tempo de envelhecimento baseado no clima de cada país (Kim *et al.*, 2018, pag. 74).

A Figura 4 exemplifica os ensaios realizados após caracterização.

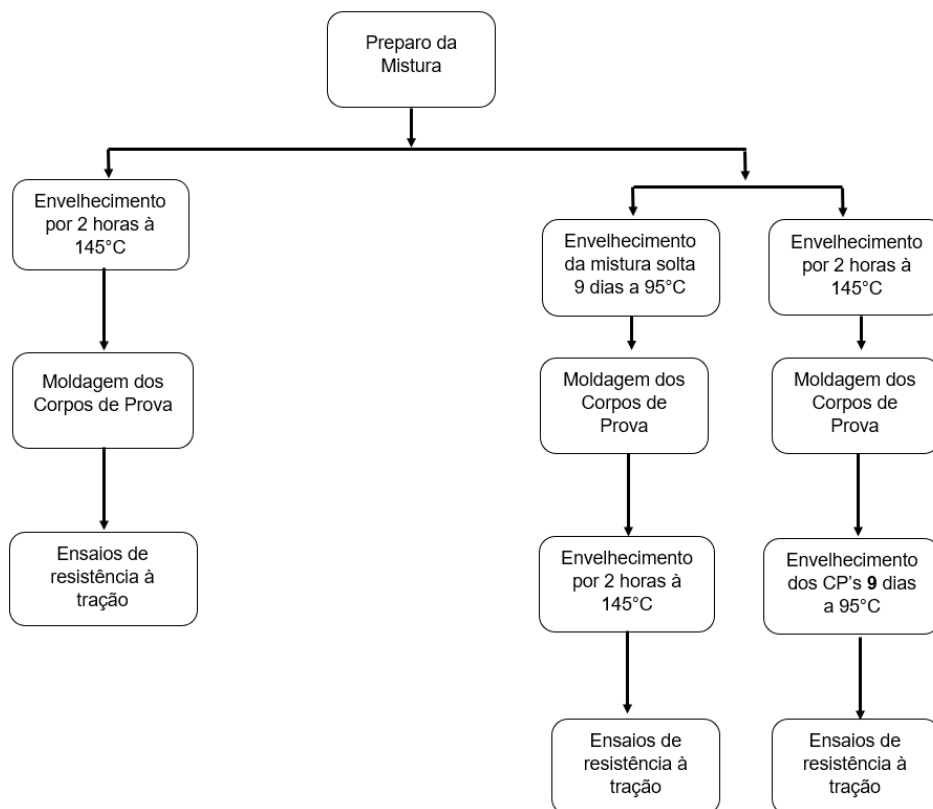


Figura 4: Ensaio experimentais

3. RESULTADOS

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, (Figura 5), sendo eles 1,63%, 2,31% e 5,92%, apurados pelo ensaio de potencial de expansão DNIT-ME 113/2009.

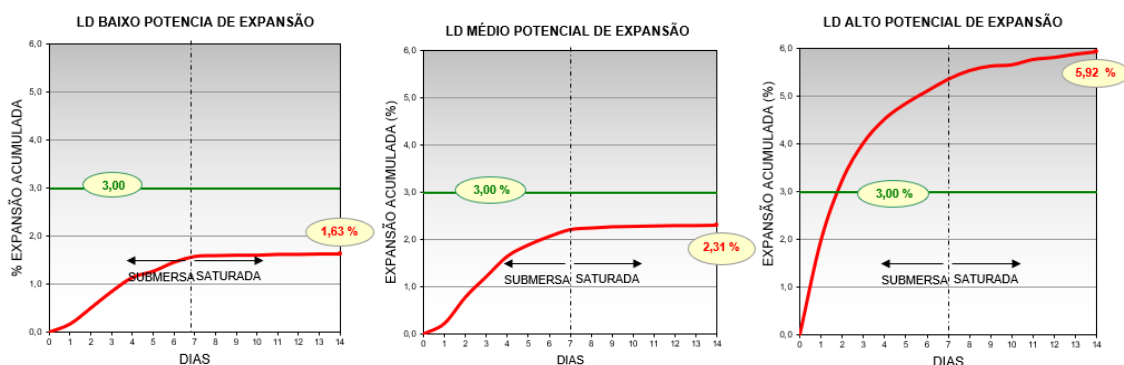


Figura 5: Resultados do ensaio de potencial de expansão.

A Tabela 3 mostra os resultados de caracterização encontrados.

Tabela 3: Resultado da caracterização da escória LD em diferentes níveis de expansão

Ensaio	Limites (DNIT-ES 031/2006)	Exp. LD < 3	Exp. LD ≈ 3	Exp. 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
Abrassão 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	-

Observa-se que houve mudança nas características do material devido a variação de expansão, o que pode acarretar a alterações tanto nos parâmetros volumétricos quanto mecânicos nas misturas asfálticas. Nota-se que a absorção tende a aumentar quando o nível de expansão é reduzido, o que pode levar a incrementos do teor de CAP do projeto. Para os valores de Abrassão Los Angeles 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.

Para verificar se o revestimento de escória por CAP poderia encapsular o efeito da expansão, foi realizado o teste PTM130, mas aplicado a misturas de asfalto, denominado "PTM130 Modificado". A Figura 6 mostra a evolução da expansão das misturas asfálticas estudada ao longo de 14 dias de observações e medições.

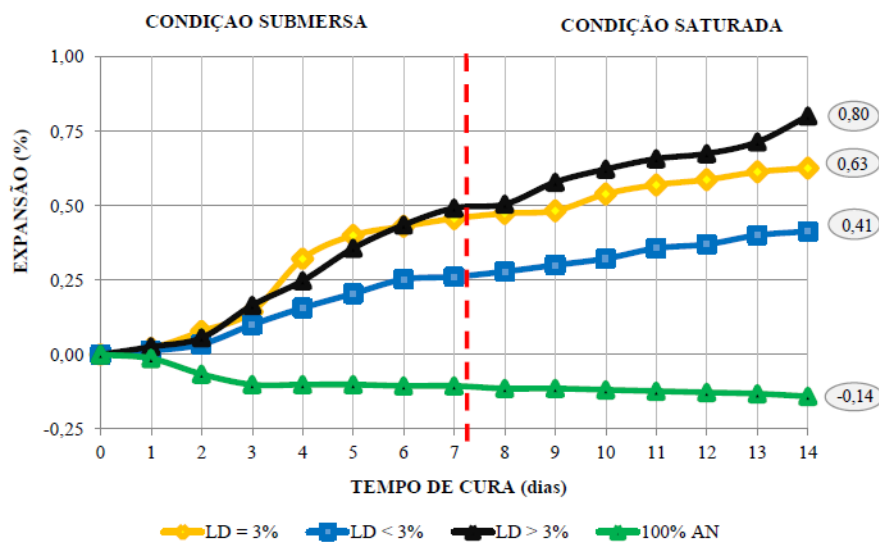


Figura 6: PTM Modificado

É possível verificar que as misturas asfálticas contendo agregado siderúrgico e AN apresentaram valores de expansão significativamente inferiores aos obtidos pelas amostras de agregado siderúrgico puro, a redução nas características expansivas foi obtida para todas as misturas estudadas, os resultados mostram que o aglutinante asfáltico pode encapsular as características expansivas do agregado siderúrgico.

A Tabela 4, 5 e 6 apresenta os resultados de resistência a tração para as misturas estudadas em dois métodos de envelhecimentos. Como era esperado, com relação aos corpos de prova envelhecidos a curto prazo, houve um incremento de resistência à tração dos corpos de prova submetidos ao envelhecimento a longo prazo. No entanto, os valores obtidos no envelhecimento a longo prazo foram quase que independentes do método de envelhecimento utilizado, com um ligeiro incremento das misturas envelhecidas com relação ao envelhecimento de corpos de prova. Com relação aos diferentes níveis de expansão dos agregados siderúrgicos, não houve diferença significativa dos valores de resistência à tração, mostrando que os efeitos expansivos para o percentual de substituição estudados, não influenciaram no desempenho mecânico das misturas. Isto indica que pode de fato estar havendo um encapsulamento da expansão da escória. As misturas 100% AN tiveram um valor percentual de incremento de resistência à tração de 27-41%, sendo superior ao incremento obtidos para as misturas com 25% de LD (20-25%). Estes resultados podem ter sido em decorrência ou do retardo do envelhecimento do ligante pela adição de escória ou pela diminuição da RT devido a efeitos expansivos. No entanto, este último teria sido evidenciado entre misturas com diferentes níveis de expansão, o que não foi observado neste estudo.

Tabela 4: Resultados de CPs não envelhecidos

RESISTENCIA A TRAÇÃO - RT					
MISTURAS	NÃO ENVELHECIDO (Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão da RT	VV Médio	Desvio Padrão do VV
100% AN	1,51	1,62	0,089938	3,66%	0,000656
	1,63				
	1,73				
25% (LD < 3)	1,39	1,56	0,121198	4,36%	0,000905
	1,59				
	1,68				
25% (LD ≈ 3)	1,63	1,57	0,058878	3,59%	0,001322
	1,49				
	1,59				
25% (LD > 3)	1,65	1,59	0,044969	3,84%	0,002268
	1,54				
	1,59				

Tabela 5: Resultados de CPs envelhecidos após compactação

RESISTENCIA A TRAÇÃO - RT					
MISTURAS	CP ENVELHECIDO (Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão da RT	VV Médio	Desvio Padrão do VV
100% AN	2,08	2,07	0,057927	3,57%	0,001229
	1,99				
	2,13				
25% (LD < 3)	1,87	1,88	0,032998	4,27%	0,000927
	1,84				
	1,92				

	1,84				
25% (LD \approx 3)	2,11	1,92	0,129701	3,84%	0,003029
	1,83				
	1,94				
25% (LD > 3)	1,91	1,93	0,014142	3,91%	0,001155
	1,94				

Tabela 6: Resultados de misturas envelhecidas em estufa com posterior compactação de CPs

RESISTENCIA A TRAÇÃO - RT					
MISTURAS	MISTURA ENVELHECIDA (Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão da RT	VV Médio	Desvio Padrão do VV
	2,48				
100% AN	2,18	2,29	0,134907	3,71%	0,000848
	2,21				
	1,95				
25% (LD < 3)	1,92	1,95	0,020548	4,21%	0,001971
	1,97				
	1,93				
25% (LD \approx 3)	1,98	1,95	0,023570	3,89%	0,000776
	1,93				
	1,86				
25% (LD > 3)	2,01	1,94	0,061644	3,97%	0,003040
	1,95				

4. CONCLUSÕES

Com os resultados apresentados é possível concluir que:

- escórias com diferentes níveis de expansão possuem algumas alterações nas suas características individuais, sendo observado mais significativamente sua influência na absorção do agregado siderúrgico. Esta alteração pode levar a um maior consumo de ligante para misturas produzidas com escória com menores níveis de expansão. 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 pela resistência à tração das misturas envelhecidas a curto prazo, não foi encontrada diferença significativa na resistência a tração com escória em diferentes níveis de expansão. A curto prazo, comparando as misturas produzidas com 100% AN com àquelas produzidas com 25% de escória LD,

não houve diferença significativa dos valores de RT. Este resultado indica que pode haver um encapsulamento do agregado siderúrgico pelo ligante asfáltico.

- Com relação ao desempenho mecânico avaliado pela resistência à tração das misturas envelhecidas a longo prazo, não foi observado diferença significativa entre os dois métodos de envelhecimento empregados. Observou-se, no entanto, 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. Estes questionamentos estão sendo investigados por outros métodos para que conclusões mais definitivas possam ser colocadas.

REFERENCIAS

- Araújo, M. F. A. (2007). Efeito da Radiação Solar no Envelhecimento do Concreto Betuminoso Usinado a Quente. Dissertação de Mestrado, UFOP: Ouro Preto.
- Beshears, S., and A. Tutumluer. (2013). Reclaimed Asphalt Pavement with Steel Slag Aggregate. Successful Use in Illinois Pavements. TR News, 288, pp. 46–47
- DNER-ME 043/95 – Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall; Norma rodoviária – Método de Ensaio.
- DNER-ME 052/95 – Agregado em estado solto – determinação da massa unitária; Norma rodoviária – Método de ensaio.
- DNER-ME 054/97 – Equivalente de areia; Norma rodoviária – Método de Ensaio.
- DNER-ME 078/94 – Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso; Norma rodoviária – Método de Ensaio.
- DNIT 113/2009 – ME, Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria – Método de ensaio.
- DNIT 136/2017 – ME, Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência a tração por compressão diametral – Método de ensaio: Revisão da norma DNER 136/2010.
- Groenniger, J.; CANNONE, F. A.; ISAILOVIC, I.; WANG, D.; WISTUBA, M. P. (2017). Experimental investigation of asphalt mixture containing Linz-Donawitz steel slag. Journal of Traffic and Transportation Engineering
- 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.
- 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 2019.
- Kim, Y. R. et. al. Long (2018). Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction. The National Academies Press.
- Kim, K.; HAENG JO, S.; KIM, N.; KIM, H. (2018). Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage. Construction and Building Materials.
- Lobato, N. C. C. (2014). Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Indústria Siderúrgica 156 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Morilha Junio, A., (2004). 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.
- NBR_ Norma Brasileira NBR NM 51/2001 – Agregado graúdo – Ensaios de abrasão “Los Angeles”.
- NBR_ Norma Brasileira NBR 6458/1984 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.
- NBR_ Norma Brasileira NBR 7181/2016 – Análise granulométrica
- Oliveira, A. H. (2014). 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.
- Pennsylvania Test Method. Evaluation of Potential Expansion of Steel Slags - PTM 130. Pennsylvania Department of Transportation, PA, 2016, pp. 1–8.

- Qazizadeh, M. J., H. Farhad, A. Kavussi, and A. Sadeghi. (2018). Evaluating the Fatigue Behavior of Asphalt Mixtures Containing Electric Arc Furnace and Basic Oxygen Furnace Slags Using Surface Free Energy Estimation. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 188, pp. 355–361.
- Schumacher, A. G. (2018) 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.
- Shen, D., C. M. Wu, and J. C. Du. (2009). Laboratory Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag for Substitution of Aggregate in Porous Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 453–461.
- Teixeira, J. E. S. L.; A. G. Schumacher; P. M. Pires; V. T. F. C. Branco e H. B. Martins (2019) Expansion Level of Steel Slag Aggregate Effects on Both Material Properties and Asphalt Mixture Performance *Transportation Research Record*.

Sidineidy Izoton (sidineidy.izoton@hotmail.com) -
Jamilla Lutif Emi Sudo Teixeira (jamilla.teixeira@ufes.br)
Patrício José Moreira Pires (patricio.pires@gmail.com)
Aécio Guilherme Schumacher (aecioschumacher@gmail.com)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514– Vitória, ES, Brasil