

Estudo sobre reciclagem da escória de aciaria em camadas de pavimentos

Neste trabalho são apresentados perfis padrão de pavimentos contendo escória de aciaria LD como agregado em mistura asfáltica, mistura solo-escória e mistura escória-cimento. A escória de aciaria LD, foi caracterizada fisicamente pelos ensaios tradicionais de agregados de pavimentação. Foram realizados os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e Difração de Raios-X. Foram realizadas dosagens de misturas asfálticas tipo C.A.U.Q com a utilização do agregado alternativo e cimento com o uso de CAP 50/70, utilizando o método Marshall, sendo caracterizada mecanicamente, através dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência por compressão diametral e fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Apresentam-se os resultados dos ensaios realizados com o solo utilizado na pesquisa. A mistura tipo C.A.U.Q obteve bons resultados de estabilidade, resistência à tração por compressão diametral e módulo resiliência. São apresentados os resultados do módulo resiliente das misturas solo-escória e solo-cimento. Foram elaborados três perfis padrão de pavimentos com a utilização do programa SisPav. Conclui-se que escória de aciaria LD é de uso favorável em pavimentos e contribui tanto economicamente quanto ambientalmente para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Escória de Aciaria; Estruturas de Pavimentos; Agregado Alternativo.

Study on recycling steelmaking slag in pavement layers

This paper presents the profiles default floors containing LD steel slag as aggregate in asphalt mixture, soil-slag mixture and slag-cement mixture. The LD steel slag, from the Atlantic Steel Company (CSA), has been physically characterized by traditional tests of aggregate paving. Were performed the testing for Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction. Dosages of type CAUQ asphalt mixtures using the alternative aggregate, cement and CAP 50/70 were carried out using the Marshall method, characterized mechanically through testing of indirect tensile strength, resilient modulus, and fatigue of diametrical compression under controlled stress. Presents the results of tests performed with the soil used in the research. The mixture obtained presents good results CAUQ kind of stability, tensile strength and modulus by diametrical compression resilience. The results of the resilient modulus of the soil-gravel mixtures and soil-cement are presented. Were prepared three standard profiles floor using the SisPav program. Steel slag is a favorable LD use in pavements, contributes to economic and environmentally sustainable development.

Keywords: Steel Slag; Paviment Structure; Alternative Aggregate.

Topic: **Sustentabilidade nos Transportes**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Received: **09/03/2020**

Approved: **20/04/2020**

Ana Carolina Duarte Bona 

Instituto Militar de Engenharia, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/7186574826344870>

<http://orcid.org/0000-0002-8764-1163>

acduartebona@gmail.com

Virlene Leite Silveira 

Instituto Militar de Engenharia, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/1401925440816054>

<http://orcid.org/0000-0002-9723-4684>

virlene_cea@hotmail.com

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães 

Instituto Militar de Engenharia, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/8890983301899546>

<http://orcid.org/0000-0001-9244-7034>

cap-guimaraes@hotmail.com

Camila Nascimento Padilha Silva

Instituto Militar de Engenharia, Brasil

camila_padilha15@hotmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.003.0015

Referencing this:

BONA, A. C. D.; SILVEIRA, V. L.; GUIMARÃES, A. C. R.; SILVA, C. N. P..
Estudo sobre reciclagem da escória de aciaria em camadas de pavimentos. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.11, n.3, p.167-183, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.003.0015>

INTRODUÇÃO

Dentre os modais de transporte brasileiro, o rodoviário consiste no mais utilizado, tanto para escoamento de produtos quanto para o deslocamento da população. Entretanto apenas 213.453km (12,4%) dos 1.720.700km das rodovias do país são pavimentadas (CNT, 2018). A pavimentação sempre esteve ligada ao crescimento econômico do país e muito ainda precisa ser feito neste setor.

O pavimento é uma estrutura que demanda uma grande quantidade de agregados e permite a utilização de variados materiais. Com o aumento da demanda por trechos pavimentados visando uma melhoria da mobilidade urbana e um escoamento dos produtos com maior rapidez e eficiência, aumenta-se a procura por agregados, sobretudo alternativos (BRANCO, 2004). O desenvolvimento de novas pesquisas e técnicas utilizando agregados alternativos é de suma importância para um país como o Brasil, que possui diversas características regionais e com uma gama rica e diversificada em relação a agregados.

A produção de coprodutos e resíduos é bastante significativa no processo de produção de aço. Para cada tonelada de aço bruto produzido, gera-se mais de 600 kg de coprodutos e resíduos. Em 2018 a produção de aço brasileira foi de 35,4 milhões de toneladas, ocupando a nona posição no ranking mundial, e de 22 milhões de coprodutos dos quais deste 27% são agregados siderúrgicos de aciaria (IABR, 2018). Devido a esse grande volume de material gerados, inicia-se então a preocupação com a sua gestão e questões de armazenamento e a destinação correta desses resíduos.

A reutilização das escórias siderúrgicas é promissora e já está sendo empregada em diversos setores. A escória de aciaria já tem sido empregada em obras da construção civil, e particularmente em obras de pavimentação, sendo um substituto viável de agregados naturais seja em misturas asfálticas ou misturas para bases e sub-bases de pavimentação. Entretanto, a presença de metais como óxidos de cálcio, silício, ferro, magnésio e outros diversos metais pode dificultar a reutilização deste coproduto. A presença de tais metais pode gerar reações expansivas e assim causar problemas estruturais no pavimento.

A escória de aciaria é um material que têm sido bastantes estudado e empregado como material de pavimentação, com certo sucesso em ensaios de laboratório, conforme pode ser visto em Branco (2004), Branco et al. (2004), Cavalcante et al. (2009), Gimenes et al. (2008), Mendonça et al. (2010). O assunto é de significativa relevância, portanto se faz necessário estudos cada vez mais amplos para dizimar o uso deste material levando em conta questões estruturais, econômicas e ambientais.

REVISÃO TEÓRICA

Escória de aciaria e seu reuso em pavimentação

Segundo a Resolução CONAMA número 313/02, as escórias provenientes da produção de ferro e aço são classificadas como Classe II. Em seus estudos sobre a composição e utilização de escória de aciaria em estradas como pavimentação, Rohde (2002) concluiu que a escória de aciaria é classificada como não inerte, ou seja, Classe II (não perigosos) expondo que não irá provocar riscos ao meio ambiente e a sociedade. Porém

o fato do resíduo ser classificado como não perigoso, não o torna menos importante sob o olhar ambiental. E uma análise periódica da composição das escórias de aciaria deve ser realizada para manter os padrões de classificação.

Conforme a AGENDA 21, para que se atinja a maximização do reaproveitamento e da reciclagem dos resíduos deve-se desenvolver e fortalecer a capacidade nacional de reutilizar e reciclar uma proporção cada vez maior de resíduos. Para isto é necessário o desenvolvimento de pesquisas para determinar formas de reaproveitamento ou reciclagem que sejam vantajosas, rentáveis, socialmente aceitáveis e que estejam adaptadas a realidade de cada país.

Pedrosa (2010) utilizou em seu estudo escória de aciaria fornecida pela USIMINAS exposta em um pátio de estocagem para que ocorresse a estabilização natural do material. Foram utilizadas misturas asfálticas confeccionadas com cimento asfáltico de petróleo (CAP) tipo CAP 30/45 e com CAP 50/70. O estudo mostrou que a mistura asfáltica com escória de aciaria deste experimento apresentava características superiores, em termos de estabilidade e resistência tração, vida de fadiga e de deformação permanente, às de misturas asfálticas convencionais, confeccionadas com agregados naturais.

Rohde (2002) também mostrou, em sua pesquisa, a viabilidade técnica da utilização de uma escória de aciaria elétrica para base e sub-base de pavimentos. Utilizou-se a cinza pesada e a cal de carbureto para melhorar a resistência e trabalhabilidade da escória, encontram para a mistura final teores ótimos de 80% de escória, 20% de cinza pesada e 3% de cal de carbureto. Para esta mistura foi encontrado aumento significativo na resistência a compressão simples em corpos de prova com tempo de cura de 28 dias.

Freitas et al. (2008) estudaram o emprego de uma escória de aciaria como alternativa para rodovias de alto volume de tráfego, em misturas asfálticas de elevados desempenho e durabilidade, denominadas EME (Enrobé a Module Élevé) que são utilizadas em camadas de base ou de ligação na França. Os autores concluíram que os maiores valores de módulo resiliente das misturas asfálticas foram obtidos nas misturas com CAP 30/45 modificado com Sasobit, sendo iguais para os dois tipos de agregados estudados (escória e agregado convencional). Já os resultados para o ligante resíduo de vácuo e CAP 30/45 foram maiores para escória de aciaria. A resistência à tração com o CAP 30/45 foi maior com escória do que a dos demais ligantes utilizados na pesquisa. Ressaltou-se também que o reaproveitamento da escória apresenta vantagem ambiental de grande valor por evitar a busca por novas jazidas de materiais naturais e ao mesmo tempo reduzem as pilhas de estocagem em pátios de resíduos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Escória de Aciaria LD

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a norma DNER-ME 083/98, tanto para o agregado graúdo quanto para o agregado miúdo. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas da escória utilizada.

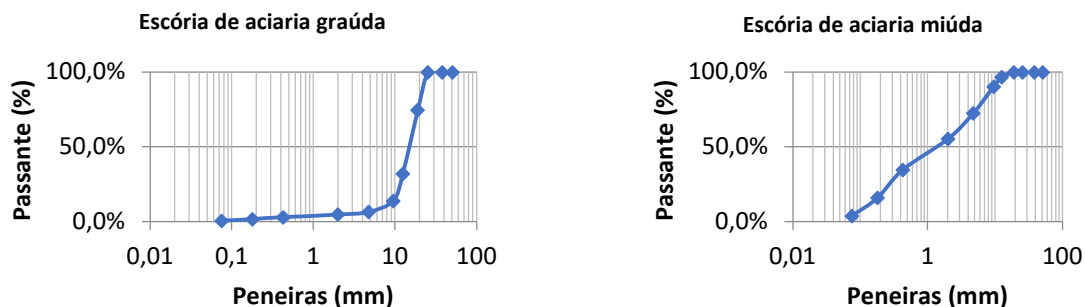


Figura 1: Curvas granulométricas da escória de aciaria LD graúda e miúda utilizada no estudo.

As densidades (real e aparente) e a absorção da água da escória de aciaria graúda foram obtidas através da média entre os valores de dois ensaios consecutivos de acordo com a especificação DNER-ME 081/98, sendo que para a escória miúda foi utilizada a norma DNER- ME 084/95, os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultado das densidades e absorção da escória graúda e miúda utilizada neste trabalho.

Amostra	Densidade Real	Densidade Aparente	Massa específica aparente	Absorção
ESCÓRIA GRAÚDA	3,27	3,12	1,87	1,38
ESCÓRIA MIÚDA	2,8	-	1,54	-

A composição química da escória é normalmente expressa em termos de óxidos simples calculados a partir da análise elementar determinado por fluorescência de raios-x. A Tabela 2 apresenta a gama de compostos presentes na escória de aciaria utilizada.

Tabela 2: Composição química da escória utilizada.

Constituinte	Composição (%)
CaO	82,06
SiO ₂	7,63
FeO	9,5
MgO	0,82
Al ₂ O ₃	0

O resultado do ensaio de absorção (1,38%) está de acordo com a norma DNER-EM 262/94 que preconiza absorção de água de 1 a 2%. Foi realizado o ensaio de equivalente de areia de acordo com a norma DNER-ME 054/97 com a escória de aciaria LD miúda, obteve-se resultado de 86,21% que atende a norma DNIT-ES 031/2006 que preconiza o valor igual ou superior a 50% para o equivalente de areia em agregados miúdos e comprova a pequena presença de frações argilosas na escória.

O ensaio de adesividade foi realizado conforme o método DNER- ME 078/94 e obteve-se resultado não satisfatório para a escória com o ligante puro e ao se adicionar Dope, melhorador de adesividade, ocorreu a adesividade completa. O difratograma de raio-X obtido, Figura 2, revela uma grande incidência de picos, indicando que a estrutura da escória é predominantemente cristalina.

Foram realizados três ensaios para fins da avaliação de sua perda ao choque com a escória de aciaria LD graúda recebida, utilizando-se o equipamento Treton, de acordo com a norma DNER-ME 399/99 O valor médio de T igual a 9,57% indica que a amostra analisada possui elevada resistência ao choque, visto que o

limite é $T < 60\%$ (BERNUCCI et al., 2007), fato favorável à sua utilização como material de pavimentação.

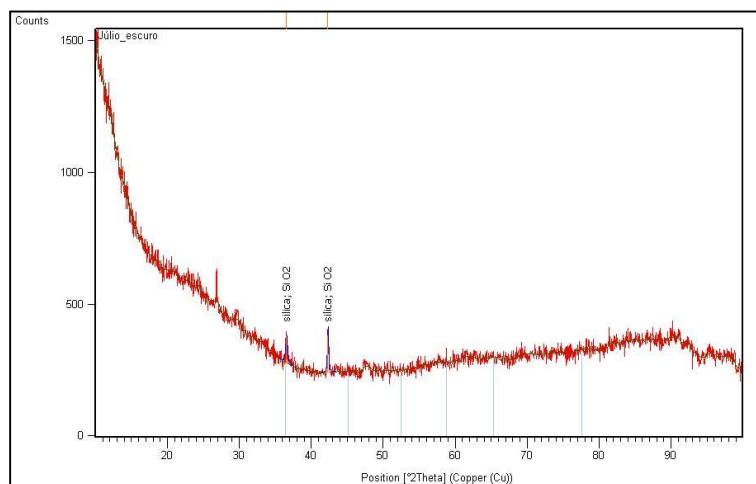


Figura 2: Difratograma da amostra de escória de aciaria miúda.

Utilizando-se a escória de aciaria graúda também foi realizado o ensaio de abrasão Los Angeles conforme a norma DNER-ME 035/98, O resultado 21,45%, atendeu os limites preconizados nas normas DNIT-ES 031/2006 e DNIT 114/2009. O ensaio de durabilidade foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 089/94 tendo como resultado o valor 2,13% de perda após solução de sulfato de sódio anidro. O resultado está de acordo com o limite, de 0 a 5%, da norma DNIT - ES 031/2006 que preconiza uma perda menor do que 12%.

Foi realizado ensaio de módulo resiliente de acordo com o procedimento descrito em Medina et al. (2005), sendo o corpo de prova moldado com a umidade no teor ótimo obtido pela experiência do operador. O resultado da variação do módulo com as tensões desvio e tensão confinante são apresentados na Figura 3.

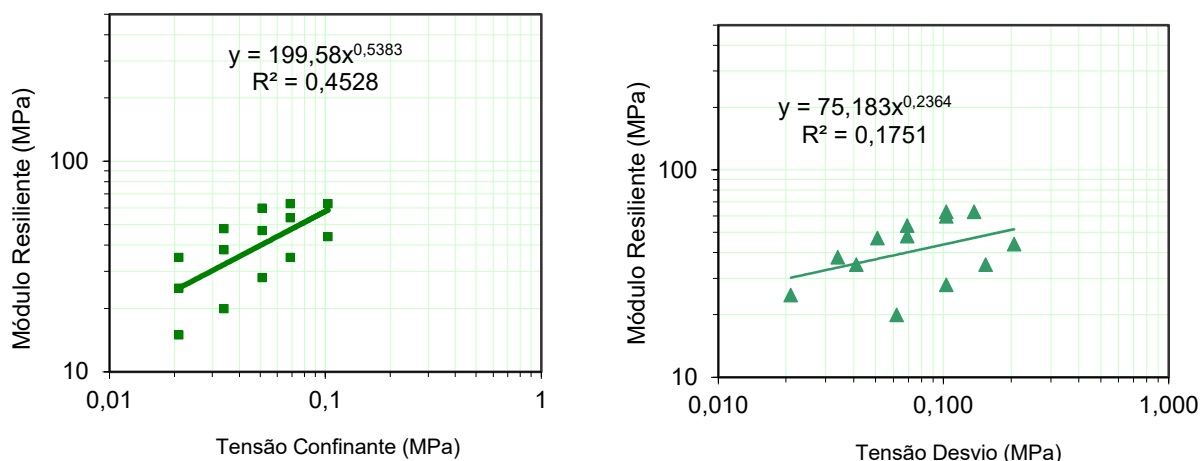


Figura 3: Variação do Módulo Resiliente com as tensões desvio e confinante do CP moldado com a escória de aciaria LD pura.

Cimento

A curva granulométrica é apresentada na Figura 4. O cimento utilizado possui massa específica

aparente igual a $1,12\text{g/cm}^3$, determinada pelo método do caixote e massa específica real igual a $3,10\text{g/cm}^3$ determinada pelo frasco Le Chatelier (DNER-ME 085/94).

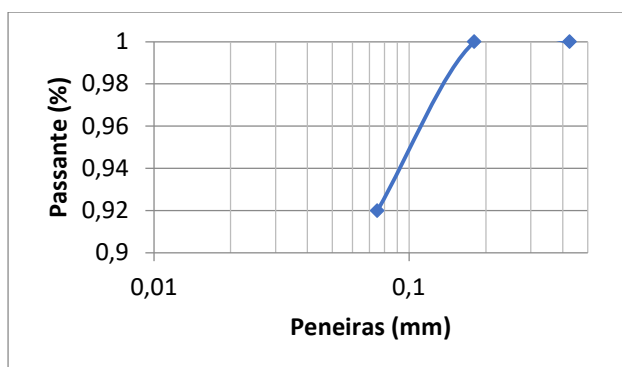


Figura 4: Curva Granulométrica do cimento utilizado neste estudo.

Ligante

A caracterização do ligante asfáltico utilizado na mistura asfáltica deste trabalho é apresentada a seguir, sendo possível concluir de acordo com a Tabela 3 que se trata de um CAP 50/70.

Tabela 3: Características do CAP 50/70 utilizado neste estudo.

Ensaio – CAP 50/70	Unidades	Limites	Resultados
Penetração (100g, 5s, 25°C, 0,1mm)	0,1mm	50 a 70	53,3
Ponto de Amolecimento, min.	°C	46	50
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20rpm, mín.	Cp	274	377,5
Viscosidade Brookfield a 150°C, SP 21, mín.		112	186
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP 21		57 a 285	70
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	>240
Ductilidade a 25°C, mín.	Cm	60	>100
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	5
Penetração retida, mín.	%	60	75,05
Densidade Relativa	-	-	1,04

Solo

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 080/94, a distribuição granulométrica está representada na Figura 5, se observa a grande quantidade de finos já previstos na lavagem.

A compactação foi realizada de acordo com a norma DNER-ME 162/94 considerando-se a energia do ensaio proctor intermediária (26 golpes). O material apresentou umidade higroscópica igual a 3,10%. Obteve-se umidade ótima igual a 15,04% e densidade máxima igual a $0,459\text{ g/cm}^3$. Foi realizado o ensaio expedito de classificação MCT, denominado método das pastilhas, onde se obteve penetração média de 5 mm e contração diametral de 0,17 mm, sendo o solo foi classificado como solo do tipo NA-NS'.

Solos do grupo NA são areias, siltes e misturas destes, nos quais os grãos são constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica. Quando compactados, possuem capacidade de suporte de pequena a média e, geralmente, são muito erodíveis. Solos do Grupo NS' são saprolíticos silto-arenosos que quando compactados na umidade ótima e massa específica máxima da energia normal, baixa capacidade de suporte quando imersos em água, baixo módulo de resiliência e elevada erodibilidade (NOGAMI et al., 1995).

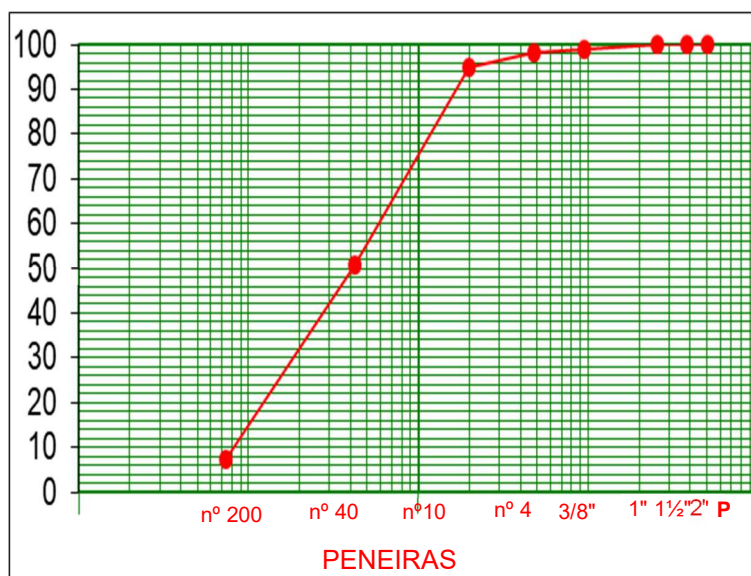


Figura 5: Granulometria da jazida Transplanar.

Os ensaios para determinação dos limites de liquidez e plasticidade foram realizados de acordo com as normas DNER-ME 122/94 e 082/94 respectivamente. Os resultados foram 41,8% para LL e 11,7 para o índice de plasticidade, observa-se que o solo não possui propriedade coerente para utilização em bases, sub-bases ou reforço do subleito, pois de acordo com Nogami et al. (1995), os resultados usuais para Limite de Liquidez são de no máximo 25% e para o Índice de Plasticidade no máximo 6%.

Dosagem da mistura asfáltica

Foram moldados corpos de prova considerando agregados de escória de aciaria LD, encaixados na faixa B da norma DNIT- ES 031/2006 e obtido teor ótimo de ligante. O traço 01 foi feito utilizando 33% de escória graúda, 64% de escória miúda e 3% de cimento. Foram moldados corpos de prova com três teores distintos de ligante, sendo 4,5, 5,5 e 6,5% de ligante. Porém na preparação dos corpos de prova (CP's), percebeu-se que a escória miúda absorvia todo ligante primeiramente, ficando a escória graúda sem cobertura. A mistura ficou esfarelada, e por isso foi feita a tentativa de um novo traço onde a porcentagem do pó fosse diminuída.

O traço 02 foi feito com 47% de escória graúda, 50% de escória miúda e 3% de cimento, com essas porcentagens, foi possível moldar copos de prova a partir de 6% de ligante. A Figura 6 ilustra o enquadramento granulométrico do traço 02 elaborado na faixa B da norma DNIT - ES 031/2006. Sendo possível observar o enquadramento da mistura dentro dos limites inferior e superior.

Foram feitos corpos de prova com 6,7,8 e 9% de ligante e durante a mistura dos CP's, observou-se para todas as porcentagens a dificuldade de cobertura da escória graúda. Os resultados de volumetria, estabilidade, fluência e resistência à tração, utilizando as dosagens 6, 7, 8 e 9% de ligante são apresentados na Tabela 4.

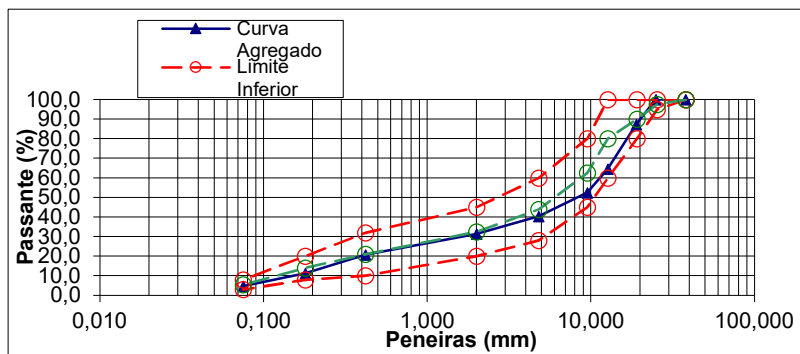


Figura 6: Enquadramento da mistura feita com o traço 02 na faixa B do DNIT.

Tabela 4: Enquadramento granulométrico da mistura na faixa B do DNIT.

Características	Unidade	Valor	Valor	Valor	Valor
Teor Ótimo	%	6	7	8	9
Gmm	-	2,59	2,45	2,52	2,48
Estabilidade	Kgf	1239	1341	1478	1536
Fluência	mm	20	19,3	19,7	20
RT a 25°C	MPa	1,01	1,26	1,25	1,23
Vv	%	6,3	-0,7	2,6	-1,5
VAM	%	20,31	15,94	21,46	20,25
RBV	%	70,3	104,3	88,8	107,8

Encontrou-se como teor ótimo do ligante CAP 50/70 utilizado na mistura, o valor de 8,55% sendo utilizada a densidade máxima medida (Gmm) obtida pelo método RICE. Foram moldados três CP's e realizado os ensaios de estabilidade e fluência e verificado o traço em relação à volumetria. Os resultados da dosagem dos CP's moldados para o traço 02 com o teor ótimo de ligante igual a 8,55% são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados da dosagem do teor ótimo 8,55% de ligante do traço 02.

Características	Unidade	Valor
Teor Ótimo	%	8,55
Gmm	-	3,14
Estabilidade	Kgf	1666
Fluência	Mm	19
Vv	%	17,4
VCB	%	21,3
RBV	%	55,4

Comparando-se a Tabela 9 com os requisitos de dosagem de concreto asfáltico da norma do DNIT-ES 031/2006, fica claro que a mistura não atendeu os valores de Volume de Vazios (Vv) e Relação Betume Vazio (RBV) mas superou o a estabilidade mínima exigida. Testaram-se mais três CP's com 8,35% de ligante. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados da dosagem do teor ótimo 8,35% de ligante do traço 02.

Características	Unidade	Valor
Teor Ótimo	%	8,35
Gmm	-	1,38
Estabilidade	Kgf	1435,1
Fluência	Mm	19,7
Vazios	%	-90,2
VCB	%	21,1
VAM	%	-69,2
RBV	%	-30,5

A densidade máxima medida (Gmm) não considera as densidades dos constituintes separadamente

e já considera a absorção do ligante, portanto considerar uma mistura totalmente heterogênea como um todo, no caso do método RICE, deve ser o motivo de tamanha variação nos parâmetros volumétricos. Foi feita a dosagem a partir da densidade máxima teórica (DMT) para o mesmo traço. Obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados da dosagem do Teor 7,5% de ligante do Traço 02 a partir da DMT.

Características	Unidade	Valor
Teor Ótimo	%	7,5
DMT	-	2,645
Estabilidade	Kgf	1478
Fluência	mm	18,7
Vazios	%	2
RBV	%	90,2

Os resultados apresentados mostraram-se muito mais coerentes, porém não enquadraram na norma DNIT - ES 031/2006. Foi refeito o traço para a porcentagem 7,8% de ligante moldados 6 CP's para ensaio de volumetria, estabilidade, fluência e RT. A Tabela 8 nos mostra novamente valores discrepantes, portanto para seguir com o estudo, arbitrou-se o teor ótimo de 7,5% pois foi o que mais apresentou valores próximos dos exigidos em norma. Foram moldados 20 CP's, sendo nove para ensaio de fadiga, cinco para ensaio de MR, três para RT e três para estabilidade, fluência e volumetria.

Tabela 8: Resultados da dosagem do Teor 7,8% de ligante do Traço 02 a partir da DMT.

Características	Unidade	Valor
Teor Ótimo	%	7,8
DMT	-	2,631
Estabilidade	Kgf	928
Fluência	mm	19,3
Vazios	%	-8
VAM	%	13,29
RBV	%	160,8
RT	MPa	0,76

Tabela 9: Resultados de volumetria dos 20 CP's moldados com 7,5% de ligante.

Dado	D. Aparente	Vv	VCB	VAM	RBV
CP 1	2,537	4,1	18,3	22,4	81,7
CP 2	2,583	2,4	18,6	21	88,8
CP 3	2,492	5,8	18	23,7	75,7
CP 4	2,477	6,3	17,9	24,2	73,8
CP 5	2,505	5,3	18,1	23,4	77,3
CP 6	2,41	8,9	17,4	26,3	66,2
CP 7	2,364	10,6	17	27,7	61,6
CP 8	2,451	7,3	17,7	25	70,6
CP 9	2,373	10,3	17,1	27,4	62,4
CP 10	2,519	4,7	18,2	22,9	79,3
CP 11	2,456	7,2	17,7	24,9	71,2
CP 12	2,455	7,2	17,7	24,9	71,1
CP 13	2,433	8	17,5	25,5	68,7
CP 14	2,447	7,5	17,6	25,1	70,2
CP 15	2,481	6,2	17,9	24,1	74,3
CP 16	2,539	4	18,3	22,3	82,1
CP 17	2,477	6,3	17,9	24,2	73,8
CP 18	2,412	8,8	17,4	26,2	66,4
CP 19	2,505	5,3	18,1	23,3	77,4
CP 20	2,475	6,4	17,9	24,3	73,6

A Tabela 9 apresenta os resultados da volumetria dos 20 CP's moldados. Pode-se observar a variação

dos valores para cada corpo de prova e que os CP's 1, 10 e 16 atenderam os limites de Vv e RBV da norma DNIT - ES 031/2006, exceção do RBV do CP 16 que ultrapassou uma margem mínima do exigido.

Utilizou-se, portanto, o Traço 02 com 47% de escória graúda, 50% de escória miúda e 3% de cimento. Os corpos de prova foram moldados com aplicação de 75 golpes por face e com estes realizados os ensaios mecânicos de resistência à tração estática por compressão diametral e fadiga por compressão diametral à tensão controlada.

Mistura Solo-Escória

Os corpos de prova de dimensões 10x20 cm foram moldados em cilindro tripartido, com energia equivalente à intermediária do ensaio proctor (26 golpes). A Tabela 10 apresenta os valores das umidades higroscópicas, ótima, real e a quantidade de água adicionada de cada CP.

Tabela 10: Resultados das umidades e quantidade de água utilizada nos CP's de solo natural e da mistura solo-escória.

CP	Material	UMIDADES (%)			Água (ml)
		Higroscópica	Ótima	Real	
1	Solo natural	-	15,84	14,15	600
2	Solo natural	2,47	15,15	16,05	550
3	Solo-escória	2,9	14,08	13,96	560
4	Solo-escória	2,28	10,14	14,60	512

Foram realizados ensaios de Módulo Resiliente de acordo com o procedimento descrito em Medina et al. (2005), com os quatro corpos de prova moldados de dimensões 10x20 cm, sendo as amostras T1 e T2 do solo natural da jazida Transplanar e as amostras T3 e T4 da mistura solo-escória. A mistura solo-escória utilizada neste trabalho, foi realizada na razão 50/50, com o solo natural e a escória de aciaria LD miúda.

Mistura Escória-Cimento

Foi moldado um corpo de prova, considerando-se a energia intermediária do ensaio proctor (26 golpes), contendo 120g de cimento (3%) e 3.880g de escória de aciaria LD miúda e 500ml de água. Foi elaborada uma mistura com 3% de cimento e 97% de escória de aciaria LD miúda. Um corpo de prova foi moldado na energia intermediária de compactação (26 golpes por camada) e umidade no teor ótimo, obtido pela experiência do operador. O corpo de prova ficou em período de cura durante 7 dias e após foi realizado ensaio de módulo resiliente com o mesmo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos, assim como a metodologia utilizada, serão apresentados individualmente para cada mistura definida.

Mistura asfáltica

Devido à grande variabilidade dos parâmetros volumétricos obtidos nestes tipos de misturas, a avaliação mais adequada foi realizada através da caracterização mecânica (FREITAS, 2007). A Tabela 11 e 12 apresentam o resultado de RT e MR.

Tabela 11: Resultado do ensaio de RT para o Traço 02 com teor ótimo de 7,5%.

CP	RT (MPa)
1	1,11
2	1,02
3	0,94
Média	1,02

Tabela 12: Resultado de Módulo Resiliente para o Traço 02 com teor ótimo de 7.5%.

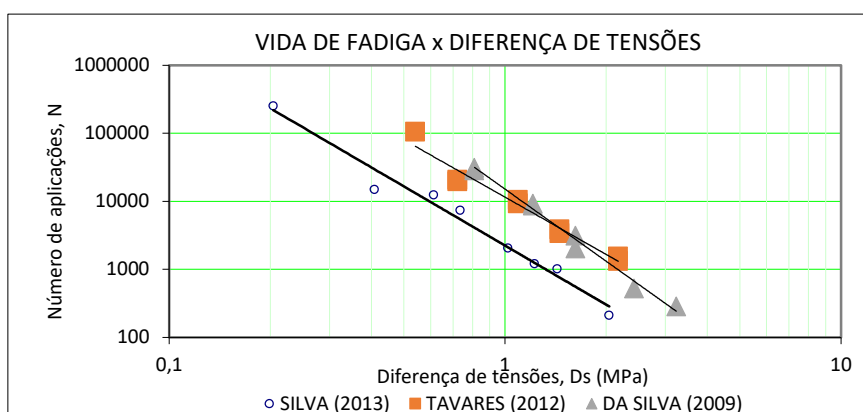
CP	MR (Mpa)
1	4764
2	6768
3	5556
4	7248
5	4927
MÉDIA	5852,6

Branco (2004, citado por SANTOS 2013), encontrou os valores de módulo resiliente para a mistura asfáltica tipo C.A.U.Q. contendo 40% de escória de aciaria igual a 2.276 MPa, para a mistura contendo 60% de escória de aciaria MR igual a 1.836 MPa e a que continha 80% de escória MR igual a 2.188 MPa. Além dos resultados apresentados de misturas elaboradas a partir do método Marshall, Cavalcante et al. (2009) utilizando a metodologia Superpave, encontraram valor de módulo resiliente para mistura asfáltica do tipo C.A.U.Q. denominada MII, contendo 57% de escória de aciaria, igual a 2.241 MPa.

Tabela 13: Parâmetros obtidos das curvas de fadiga deste estudo e das comparativas.

MISTURA	k	n	R ²
SILVA (2013)	2227,80	-2,9	0,975
SILVA (2009)	14979,00	3,51	0,987
TAVARES (2012)	11527,00	-2,8	0,96

Tavares et al. (2010) também utilizou a metodologia Superpave para elaborar mistura do tipo SMA contendo escória e pó de pedra e obteve valores de módulo resiliente variando de 10.679 MPa a 16.595 MPa, esses altos valores são justificados pelo uso do CAP 30/45 na mistura.

**Figura 7:** Vida de fadiga das misturas obtidas por Silva (2013), Tavares (2012) e Silva (2009).

Para determinação da vida de fadiga da mistura asfáltica, os CP's foram submetidos a um nível de tensão que variou entre 5% a 50% do valor da RT. A temperatura de ensaio da vida de fadiga deste estudo foi de 25°C para a maioria dos corpos de prova, sendo que em apenas dois a temperatura foi de 24°C. Na Tabela 13 estão dispostos as constantes (k e n) e o coeficiente de regressão linear (R²) obtido para a curva de fadiga deste estudo, representada na Figura 7 e também das misturas utilizadas como comparação, sendo uma mistura do tipo SMA com escória obtida do trabalho de Tavares (2012) e outra mistura do tipo CAUQ

com agregados convencionais, referente à mistura M1 do trabalho de Silva (2010).

A curva de fadiga obtida neste estudo apresenta menor inclinação em relação a outras misturas. Para os níveis de tensão analisados a mistura deste trabalho indica vida de fadiga inferior ao das misturas comparativas.

Mistura solo-escória

O solo natural se enquadrou melhor com a tensão desvio para as duas amostras, os gráficos de variação do módulo em função desta tensão, são apresentados na Figura 8.

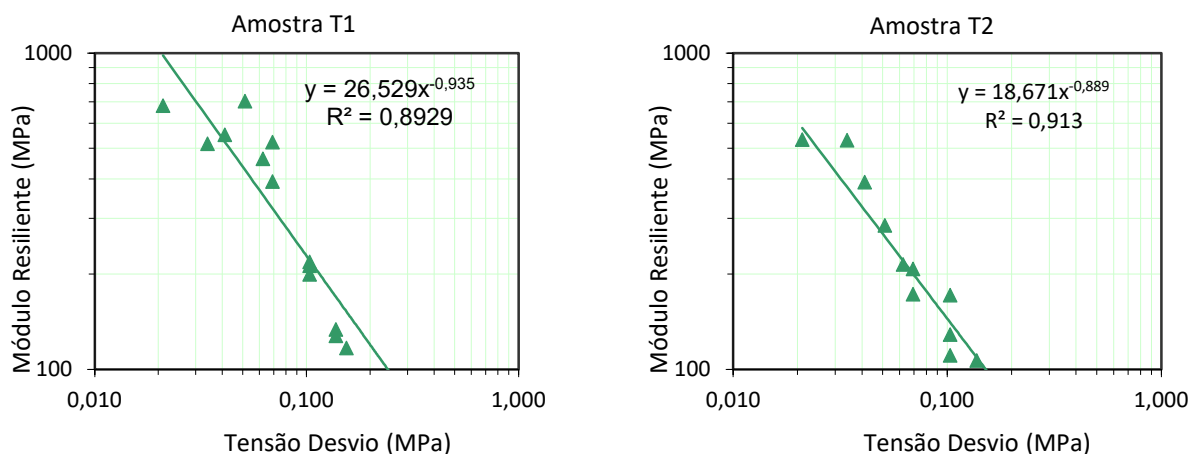


Figura 8: Resultados da variação do módulo resiliente com a tensão desvio do solo da jazida Transplanar.

Conforme pode ser observado na Figura 8, o corpo-de-prova da amostra T2 a ordem de grandeza do valor médio do módulo resiliente variou entre 100 e 533 MPa. Os ensaios realizados com o solo natural indicaram melhor enquadramento em função da tensão desvio, fato que indica em tese, uma preponderância da fração argilosa no comportamento da mistura (SANTOS, 2013). Já com a mistura solo-escória houve uma divergência, a amostra T3 se enquadrou melhor com a tensão desvio e a amostra T4 se enquadrou com a tensão confinante, os resultados estão apresentados na Figura 9.

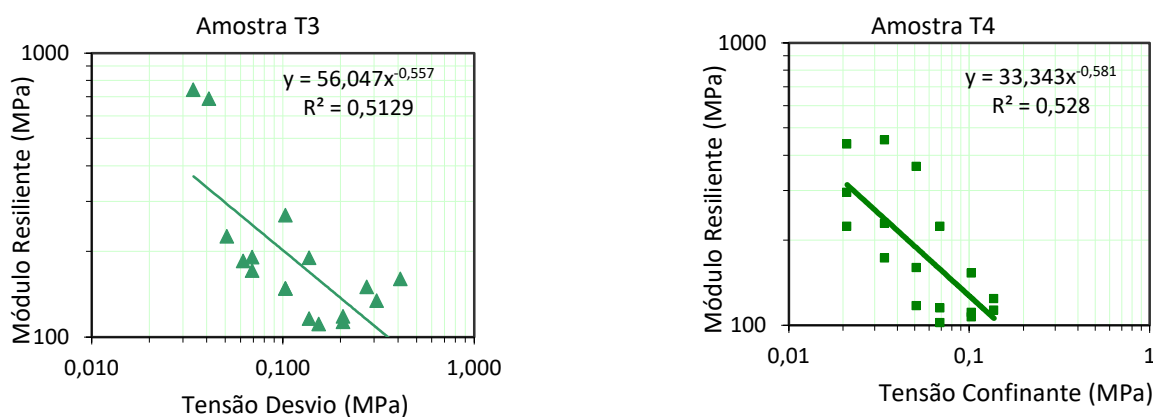


Figura 9: Resultados da variação do módulo com as tensões confinante e desvio da mistura solo-escória.

Mistura escória-cimento

O resultado da variação do módulo resiliente com as tensões desvio e confinante é apresentado na Figura 10, onde se observa que o resultado enquadrado melhor com a tensão confinante.

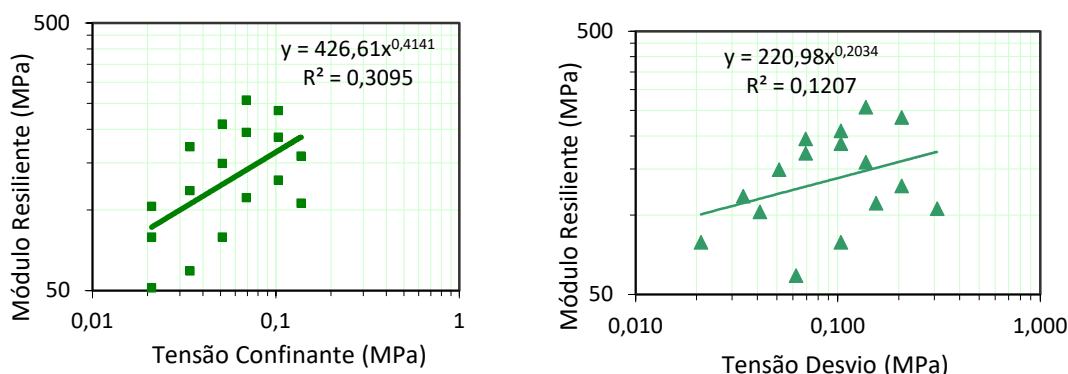


Figura 10: Variação do módulo resiliente em função da tensão desvio à direita e da tensão confinante à esquerda da mistura escória-cimento.

Pinto Junior (2012) estudou uma mistura de escória de aciaria LD, ajustada quimicamente com resíduo de granito, com cimento e concluiu que a viabilização das escórias siderúrgicas como material para construção civil é uma solução técnica, econômica e ambientalmente adequada.

Perfis Padrão

Este item tem por objetivo apresentar os resultados da vida de projeto dos perfis padrão propostos, determinados com auxílio do programa SisPav.

TIPO I

O perfil padrão Tipo I tem a escória de aciaria LD como revestimento primário e o solo da jazida Transplanar como base. Foram previstos 5cm de revestimento e 20 cm de base, porém o programa SisPav não dimensiona pavimentos que não contenham a camada de revestimento asfáltico. Foi utilizada uma camada de 3cm com valor de módulo de 2000Mpa. Esta camada por possuir valor de módulo baixo e espessura muito pequena, pouco influenciará na vida útil de projeto.

O volume de tráfego utilizado para o Tipo I é referente a baixo volume de tráfego, ou seja, N igual a 1×10^5 . A Figura 11 apresenta o resultado da vida de projeto, assim como todas as características de cada camada sendo elas, espessura, módulo resiliente, e os parâmetros de resiliência, k1 e k2 determinados no ensaio triaxial de cargas repetidas realizado.

Podemos observar que a estimativa de Vida de Projeto é de 11,6 anos para o tráfego escolhido. O afundamento de trilha de roda estimado, ou deformação permanente, é de 0,364cm, estando abaixo do limite aceitável de 1,25cm. O dano mais severo verificado foi fadiga na base do revestimento, porém como explicado, esse perfil não tem revestimento, ele foi inserido para que o programa SisPav fosse utilizado.

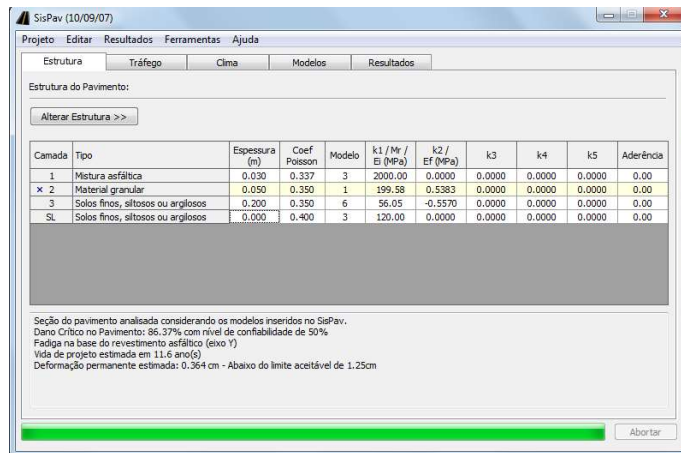


Figura 11: Janela Estrutura com as informações finais da análise do programa SisPav para o perfil Tipo I.

Tipo II

O perfil padrão Tipo II foi estimado para volume de tráfego com $N= 1 \times 10^6$, ou seja, um médio volume de tráfego. A estrutura prevista possui revestimento asfáltico, escória pura como base e a mistura solo-escória como sub-base, como podemos ver na Figura 12, assim como o resultado da Vida de Projeto para esta estrutura.

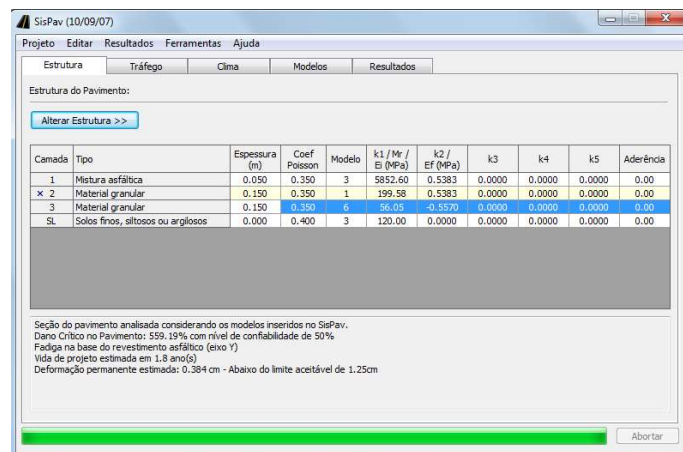


Figura 12: Janela Estrutura com as informações finais da análise do programa SisPav para o perfil Tipo II, contendo escória como base.

A estimativa de vida de projeto apresentada na Figura 12 é de 1,8 anos para o tráfego selecionado. Como a vida de projeto desta estrutura foi muito baixa, mudou-se a base de escória pura para a mistura de escória-cimento, de forma a enrijecer esta camada. A Figura 13 apresenta o resultado de forma resumida para esta estrutura.

Podemos observar uma grande melhora no resultado, passando de 1,8 anos para 5 anos de vida de projeto, o dano mais severo verificado continuou sendo fadiga na base do revestimento e a deformação permanente não teve uma alteração significativa, sendo seu valor de 0,307cm, abaixo do limite aceitável de 1,25cm.

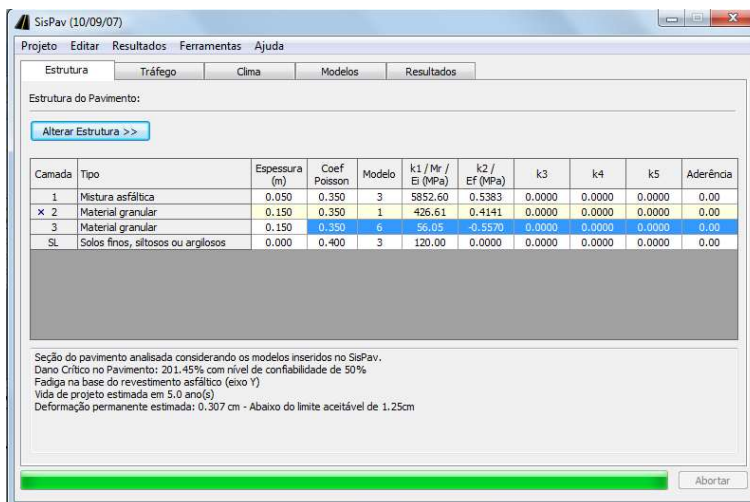


Figura 13: Estrutura com as informações finais da análise do programa SisPav para o perfil Tipo II.

TIPO III

Esta estrutura é a destinada para alto volume de tráfego, o perfil padrão Tipo III foi estimado para $N = 1 \times 10^7$. A estrutura prevista possui 10 cm de revestimento asfáltico, 13 cm de escória pura como base, 18cm da mistura escória-cimento como sub-base e 18 cm da mistura solo-escória como reforço, como podemos ver na Figura 14, assim como o resultado da vida de projeto e demais informações desta estrutura.

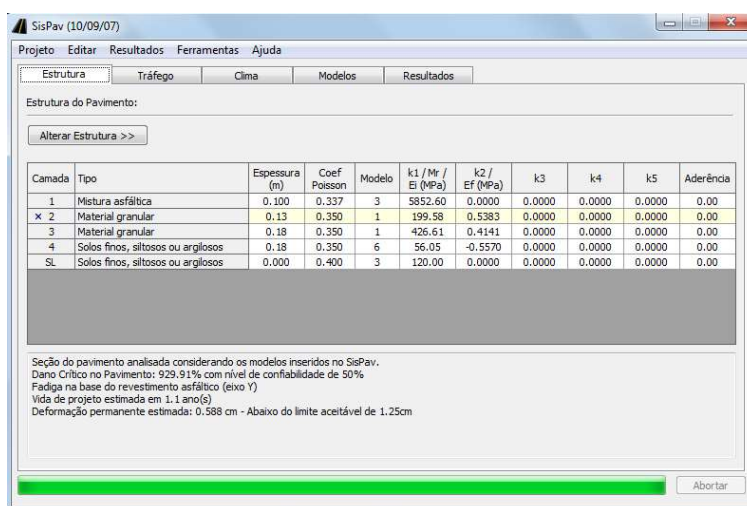
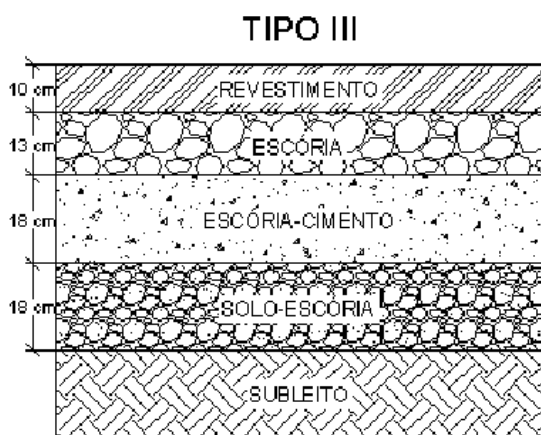


Figura 14: Janela Estrutura com as informações finais da análise do programa SisPav para o perfil Tipo III.

Pode-se observar uma vida útil muito baixa, de apenas 1,1 anos. O dano mais severo assim como nas outras estruturas apresentadas anteriormente foi a fadiga na base do revestimento, o afundamento de trilha de roda teve seu valor abaixo do limite aceitável, sendo de 0,588 cm.

CONCLUSÕES

Apesar da escória de aciaria apresentar boas qualidades técnicas para sua utilização como material de pavimentação, as características granulométricas do material disponibilizado nas condições atuais, bem como os solos utilizados nas misturas, não permitem que se tenha um amplo emprego deste material em obras de pavimentação confiáveis, fato comprovado pelas simulações numéricas do comportamento estrutural do pavimento, realizado com auxílio do programa SisPav. Entretanto ressalta-se a importância

cada vez maior de pesquisas com este e outros resíduos da indústria visando a disseminação destes materiais tendo em vista os benefícios ambientais, econômicos e estruturais.

REFERÊNCIAS

- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Abeda, 2007.
- BRANCO, V. T. F. C.. **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como agregado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- BRANCO, V. T. F. C.; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B.. O efeito da heterogeneidade do agregado de escória de aciaria nas propriedades de misturas asfálticas. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 18. **Anais**. Florianópolis, 2004.
- CAVALCANTE, E. S. B.; BESSA, I. S.; BRANCO, V. T. F. C.; SOARES, J. B.. Dosagem de misturas asfálticas segundo metodologia Superpave utilizando escória de aciaria como agregado. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS E PROJETOS DE REFORÇO, 4. **Anais**. Fortaleza, 2009.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 035**. Agregados: Determinação da Abrasão Los Angeles. DNER, 1998.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 054**. Equivalente de Areia. DNER, 1997.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 078**. Agregado Graúdo: adesividade a ligante betuminoso. DNER, 1994.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 080**. Solos: Análise granulométrica por peneiramento. DNER, 1994.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 081**. Agregados: Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo. DNER, 1998.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 082**. Solos: determinação do limite de plasticidade. DNER, 1994.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 083**. Agregados. Análise Granulométrica. DNER, 1998.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 084**. Agregados: Determinação da Densidade de Agregados Miúdos. DNER, 1995.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 085**. Material finamente pulverizado: determinação da massa específica real. DNER, 1994.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 089**. Agregado: Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Solução de Sulfato de Sódio ou Magnésio. DNER, 1994.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 122**. Solos: determinação do limite de liquidez: método de referência e método expedito. DNER, 1994.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 162**. Solos: ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. DNER, 1994.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER: ME 399**. Agregados. Determinação da Perda ao Choque no Aparelho Tréton. DNER, 1999.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT: ES 031**. Pavimentos Flexíveis. Concreto Asfáltico: Especificação de Serviço. DNIT, 2006.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT: ES 114**. Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria. DNIT, 2009.
- FREITAS, H. B.. **Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escória de aciaria como agregado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- FREITAS, H. B.; MOTTA, L. M. G.. Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. **Revista Transportes**, v.27, n.2, p.5-12, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v16i2.22>
- GIMENES, E. A. M.; PEZZIN, N.; FILHO, A. R. L.; SARTÓRIO, E. A.; MENDONÇA, R. L.. Aplicação de Escória de Aciaria em Sub-Base e Base da ES-446. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. **Anais**. Recife, 2008.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G.. **Mecânica dos Pavimentos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
- MENDONÇA, R. L.; RODRIGUES, G. L. C.. Acerita.Uma alternativa para pavimentação rodoviária. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO DA ABPV, 40. **Anais**. Rio de Janeiro, 2010.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F.. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.
- PEDROSA, R. A. A.. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do uso de agregado de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Outo Preto, Ouro Preto, 2010.
- PINTO JUNIOR, L. A. B. P.. **Fabricação de Cimento Portland Contendo Mistura de Escória de Aciaria LD e Resíduo de Granito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ROHDE, L.. **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos**: Estudo Laboratorial. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SANTOS, G. P.. **Um Estudo Sobre a Utilização da Escória de Ferroníquel em Pavimento Rodoviário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, R. G. O.. **Estudo Laboratorial do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduos Industriais de Minério de Ferro**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

TAVARES, D. S.; ODA, S.; MOTTA, L. M. G.. Utilização do Agregado Siderúrgico (Escória de Aciaria) em Pavimentação Asfáltica. In: ANPET, 24. **Anais**. Salvador, 2010.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.