

Reaproveitamento de areia de fundição residual em misturas de areia asfalto usinada a quente

Luis Miguel Gutiérrez Klinsky¹, Vivian Silveira dos Santos Bardini²,
Ana Paula Furlan³ e Glauco Tulio Pessa Fabbrì⁴

Resumo: Nos últimos anos, no Brasil, a produção de areia de fundição residual (AFR) tem aumentado em função do desenvolvimento do país. Neste estudo, analisa-se o reaproveitamento da AFR em misturas do tipo areia asfalto usinada a quente (AAUQ), para emprego em bases de pavimentos. Misturas com diferentes distribuições granulométricas, tipos e teores de ligantes asfálticos foram avaliadas através de ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração e fluência por compressão uniaxial estática (*creep*). Os resultados foram avaliados estatisticamente para determinar a influência dos fatores nos parâmetros estudados. O emprego de ligante asfáltico mais consistente produziu misturas com melhor desempenho. A adição de 10% de agregado fino britado e 3% de cal hidratada, utilizados para modificar a distribuição granulométrica das misturas, também melhorou as propriedades avaliadas. De modo geral, conclui-se que as misturas de AAUQ são uma boa alternativa para reaproveitar grandes quantidades do resíduo. [DOI:10.4237/transportes.v20i4.614](https://doi.org/10.4237/transportes.v20i4.614).

Palavras-chave: areia de fundição residual, areia asfalto usinada a quente, módulo de resiliência, *creep* estático.

Abstract: In recent years, the production of waste foundry sand (WFS) in Brazil has increased because of the economic growth of the country. This study evaluates the WFS reuse in sand asphalt hot-mix (SAHM) for its application as pavement base courses. The resilient modulus, tensile strength and static creep tests were used to analyze SAHM, varying the size distribution, asphalt binder consistency and content. The results were statistically analyzed to understand how factors influence on the studied parameters. It was verified that more consistent asphalt binder produced mixtures with higher performance. Also, the addition of 10% of crushed stone fines and 3% of hydrated lime, used to modify the size distribution, led to better behavior. It was concluded that the SAHM is an excellent opportunity to reuse high volumes of WFS.

Keywords: waste foundry sand, sand asphalt hot-mix, resilient modulus, static creep.

1. INTRODUÇÃO

A areia de fundição é o principal resíduo produzido pelas siderúrgicas. Há muitos anos diversos estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de destinar adequadamente este resíduo em aplicações externas ao processo de fundição e assim amenizar o problema de excedentes de areia de fundição residual (AFR). Devido às suas boas propriedades mecânicas, a AFR pode ser reaproveitada principalmente na área de construção civil, especificamente no setor de construção de pavimentos, para substituir parcial ou totalmente o grande volume de agregados finos naturais utilizados.

O ligante asfáltico é utilizado usualmente para o revestimento de pavimentos flexíveis. Contudo, seu emprego na estabilização de materiais para camadas de base tem se tornado frequente para aproveitar materiais que normalmente não seriam considerados para esse propósito. Além disso, o emprego de ligante asfáltico é uma boa alternativa para encapsular resíduos sólidos que poderiam

eventualmente contaminar o meio ambiente.

Nesse sentido, a mistura de areia de fundição residual e ligante asfáltico poderia resultar em um material com as características necessárias para ser utilizado como material de bases de pavimentos, a despeito do uso de ligante asfáltico implique em aumento de custos, pois se estaria eliminando o problema latente da produção e disposição do resíduo.

Assim, neste estudo é avaliado o possível reaproveitamento da areia de fundição residual em camadas de base de pavimento através de sua estabilização com ligante asfáltico. Para isso, foi realizado um estudo laboratorial de misturas do tipo areia asfalto usinada a quente (AAUQ) compostas com AFR.

No programa laboratorial foram utilizados dois tipos de ligante asfáltico, de diferentes consistências, para estabilizar a AFR. Também foi analisada a influência da adição de agregado fino britado e cal hidratada nas misturas de AAUQ, à luz das seguintes propriedades mecânicas de interesse à engenharia rodoviária: módulo de resiliência, resistência à tração e fluência por compressão uniaxial estática (*creep*).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Geração da Areia de Fundição Residual (AFR)

A moldagem em areia, apesar de sua origem remota, é ainda hoje o processo mais utilizado para a obtenção de peças metálicas fundidas. As areias têm sido usadas há muito tempo devido à sua abundância na natureza, baixo custo de exploração e suas boas propriedades refratárias, além de serem facilmente moldáveis com a adição de

¹ Luis Miguel Gutiérrez Klinsky, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: chilgk@hotmail.com).

² Vivian Silveira dos Santos Bardini, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: vibardini@yahoo.com.br).

³ Ana Paula Furlan, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: afurlan@sc.usp.br).

⁴ Glauco Tulio Pessa Fabbrì, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: glauco@sc.usp.br).

argilas ou outros aditivos aglomerantes orgânicos ou inorgânicos.

Algumas estimativas indicam que a produção de uma tonelada de metal fundido gera entre 0,25 e 1,0 tonelada de resíduo sólido e que, aproximadamente, 30% a 60% desse resíduo é constituído por areia de fundição residual (Coz, 2001). Nos Estados Unidos, por exemplo, para cada tonelada de metal fundido é gerada uma tonelada de areia de fundição residual. Já em países como Japão, o processo de fundição foi aperfeiçoado até conseguir gerar somente 0,2 tonelada de AFR por tonelada de metal fundido, (McIntyre, 1992).

A produção global anual de fundidos é de 90 milhões de toneladas (BNDES, 2011). Segundo dados da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA 2011), existem no Brasil 1.354 empresas de Fundição, que produzem aproximadamente três milhões de toneladas de materiais fundidos por ano. O Estado de São Paulo detém, aproximadamente, 35% dessa produção.

2.2. Reaproveitamento da Areia de Fundição Residual (AFR)

Por mais de duas décadas têm sido desenvolvidos estudos e pesquisas que visam reaproveitar a areia de fundição residual em atividades alternativas ao próprio processo de fundição. Em função das boas propriedades do resíduo, as pesquisas têm se focado no reuso na área de engenharia civil, principalmente no setor de construção de pavimentos.

A AFR pode ser reaproveitada para substituir o agregado fino utilizado no concreto asfáltico, como demonstraram os estudos de Bonet (2002), Coutinho Neto (2004) e Costa (2008), entre outros. Nesses trabalhos destaca-se o potencial do resíduo, mas também é enfatizada a necessidade de destinar a AFR em aplicações que demandem maiores volumes de matéria prima.

As camadas de pavimentos, subjacentes ao revestimento, apresentam uma boa alternativa para reutilizar a areia de fundição residual em quantidades maiores. Assim, Javed e Lovell (1995), Partridge *et al.* (1999), Edil e Benson, (2005), Klinsky e Fabbri (2009), entre outros, realizaram pesquisas para avaliar o reaproveitamento do resíduo nessas camadas estruturais. De modo geral, os autores recomendam evitar generalizações, mas demonstraram que as propriedades mecânicas da areia de fundição residual, pura ou misturada a outros materiais, são adequadas para emprego em bases e sub-bases de pavimentos, sem riscos de contaminação ao meio ambiente.

2.3. Bases de Areia Asfalto Usinado a Quente (AAUQ)

As misturas do tipo AAUQ são caracterizadas por conter agregados de tamanho máximo de 4,7 mm e utilizar elevados teores de ligante asfáltico. Segundo Walker e Hicks (1976), essas misturas apresentam alto volume de vazios, de 10 até 30%, contudo, isso não é crítico desde que a mistura seja utilizada em bases de pavimentos. Akili (1983) enfatiza que o alto conteúdo de vazios das misturas de AAUQ não representa uma alta permeabilidade do material, devido ao alto teor de ligante asfáltico.

A areia asfalto usinada a quente têm sido muito utilizada nas planícies costeiras no sudeste dos Estados Unidos. Segundo Potts *et al.* (1980), a experiência no Estado da Flórida mostra que o desempenho de AAUQ em bases de pavimentos tem sido satisfatória por muitos anos.

Nas regiões desérticas de Arábia Saudita, a areia de duna têm sido objeto de muitos estudos com o propósito de seu emprego em misturas asfálticas. Para Fatani e Sultan (1982), Mazumdar e Rao (1993), Al-Abdul Wahhab e Asi (1997), entre outros, o emprego de misturas de areia asfalto em bases e sub-bases de pavimentos é viável e têm se popularizado nessas regiões devido às boas características do material resultante, em relação à sua resistência mecânica e à ação deletéria da água.

As experiências de Warden e Hudson (1960), Krukar e Cook (1970), Walker e Hicks (1976) e Barksdale (1980) demonstraram que bases de AAUQ com espessura de 100 a 150 mm apresentam bom desempenho na estrutura do pavimento.

O valor do módulo de resiliência das misturas de AAUQ tem sido determinado através de carregamento axial cíclico ou carregamento diametral cíclico. Walker e Hicks (1976), por exemplo, realizaram ensaios de carregamento axial cíclico em corpos de prova de AAUQ composto de um ligante asfáltico de penetração igual a 61 (1/10mm). O valor de MR a 24 °C obtido por esses autores foi em torno de 1.700 MPa. Aldigueri (2001) utilizou a técnica de carregamento cíclico por compressão diametral para obter o módulo de resiliência de misturas do tipo AAUQ com CAP 30/45. Os resultados apresentados por esse autor oscilaram de 2.400 a 3.000 MPa, para teores de 8%, 9% e 10% de ligante asfáltico.

O ensaio de resistência à tração (RT) também tem sido bastante utilizado por diversos autores para avaliar as misturas do tipo AAUQ. Mazumdar e Rao (1993) obtiveram valores de RT entre 0,4 e 0,8 MPa, para misturas de AAUQ confeccionadas com um ligante asfáltico de penetração igual a 80 (1/10mm). Aldigueri (2001) concluiu que os valores de RT de misturas do tipo AAUQ com CAP 30/45 oscilam entre 1,0 e 1,4 MPa, valores que o autor considera satisfatórios e compatíveis também para o emprego da mistura em substituição do concreto asfáltico convencional.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, para produzir as misturas de AAUQ, foi utilizada areia de fundição residual coletada na Siderúrgica Dedini, localizada na cidade de Piracicaba/SP. Esta empresa utiliza a técnica de areia de macho com adição de resina furânica para compor os moldes de fundição. Essa técnica é utilizada principalmente para a fundição de peças de geometria complexa e nos casos em que são necessários moldes com resistência elevada.

A areia de fundição residual foi classificada como A-3,

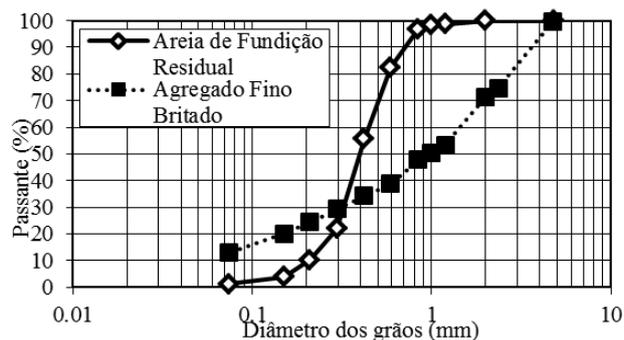


Tabela 1. Distribuições granulométricas utilizadas nas misturas de AAUQ

Denominação	Areia de Fundação Residual (%)	Agregado Fino Britado (%)	Cal Hidratada (%)	Quantidade Passante (%)				
				4,75 mm	2,00 mm	0,59 mm	0,15 mm	0,074 mm
G - I	100	0	0	100	100,0	82,45	3,93	1,25
G - II	90	10	0	100	97,14	78,08	5,54	2,41
G - III	97	0	3	100	100,0	82,97	6,81	4,21
G - IV	87	10	3	100	97,14	78,61	8,42	5,37

segundo a classificação AASHTO M 145 (*American Association of State Highway Transportation Officials*), e sua granulometria é apresentada na Figura 1. Nessa Figura ainda é apresentada a distribuição granulométrica do agregado fino britado de origem basáltica também utilizado nas misturas de areia asfalto usinada a quente (AASHTO, 1991).

Foram utilizados dois ligantes asfálticos de diferentes consistências, o CAP 30/45 (penetração de 38 dmm) e um ligante asfáltico modificado com TLA (*Trinidad Lake Asphalt*), com penetração de 22 dmm. Ambos os materiais foram fornecidos pela Betunel Tecnologia em Asfaltos, localizada em Ribeirão Preto/SP. Já a cal empregada neste estudo foi do tipo CH-I. A Tabela 1 mostra as distribuições granulométricas utilizadas nas misturas de AAUQ.

O compactador Marshall (50 golpes por face) foi utilizado para produzir os corpos de prova (CP) das misturas AAUQ, cujas dimensões são de, aproximadamente, 101,6 mm de diâmetro e 65 mm de altura, e massa em torno de 1100 g. Todos os ensaios foram realizados em três réplicas de cada mistura. Nos corpos de prova foram executados ensaios de módulo de resiliência, de acordo com a norma DNER-ME 133/94 por compressão diametral em três temperaturas: 10, 25 e 40 °C, com a finalidade de avaliar suas susceptibilidades térmicas através deste parâmetro. Já o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi executado de acordo com a norma DNER-ME 138/94, apenas a 25 °C.

Diversos autores (Hills, 1973; De Hilster e Van de Loo, 1977; Valkering *et al.* 1990; Little *et al.*, 1993) têm utilizado o ensaio de fluência por compressão uniaxial estático (*creep*) para estimar a susceptibilidade à deformação permanente de misturas asfálticas

convencionais sob diferentes condições de carregamento e temperatura. Assim, este ensaio foi executado, de acordo com as recomendações desses autores, nas misturas de AAUQ, com carregamento de 0,1 MPa e temperatura de 40 °C. Cada corpo de prova foi submetido a um pré condicionamento, e logo depois foi aplicado o carregamento durante 60 minutos e a recuperação foi considerada até 15 minutos após retirada a carga.

Nas misturas foram avaliados o tipo e teor de ligante asfáltico utilizado, assim como a presença de agregado fino britado (AFB) e cal hidratada (CH). Para isso foi desenvolvido um planejamento fatorial completo para determinar a influência de cada um desses fatores e suas interações. Assim, os fatores e os níveis desse experimento fatorial foram:

- tipo de ligante asfáltico: CAP 30/45 e TLA (2 níveis);
- teor de ligante asfáltico: 5,0; 7,0 e 9,0% (3 níveis);
- teor de agregado fino britado (AFB): 0 e 10% (2 níveis); e
- teor de cal hidratada (CH): 0 e 3,0% (2 níveis).

4. RESULTADOS

4.1. Apresentação e discussão dos resultados

Nas Figuras 2a e 2b são apresentadas as variações da porcentagem de volume de vazios (V_v) das misturas de AAUQ em função do teor e do tipo de ligante asfáltico, sendo CAP 30/45 na Figura 2a e TLA na 2b. Nessas figuras nota-se que o aumento do teor de ligante asfáltico reduziu a porcentagem de V_v . Os resultados obtidos neste estudo mostram uma tendência similar à observada por Walker e Hicks (1976). Esses autores concluíram que o incremento

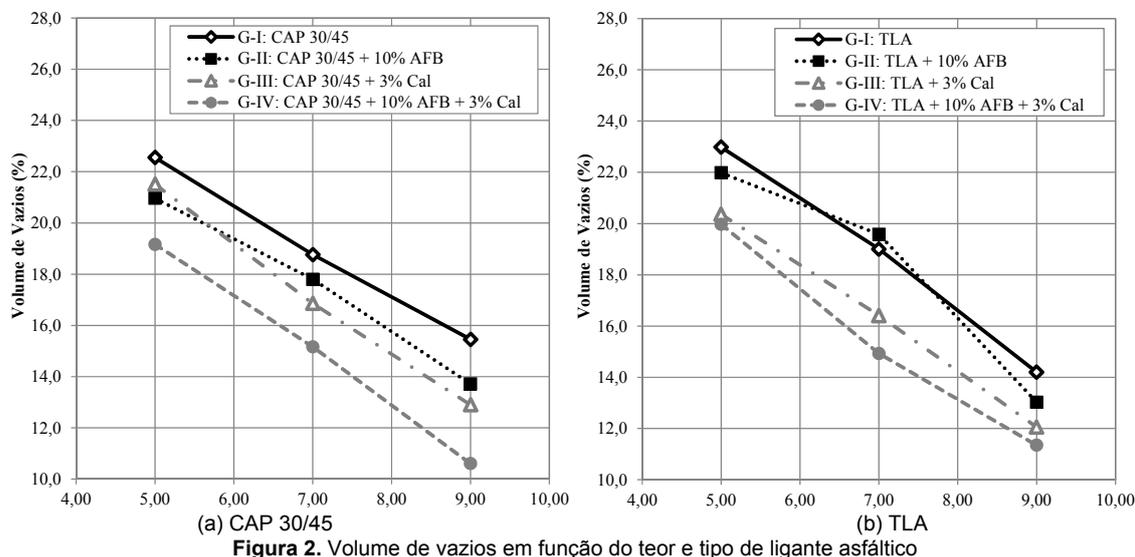


Figura 2. Volume de vazios em função do teor e tipo de ligante asfáltico

Tabela 2. Resultados de módulo de resiliência e resistência à tração das misturas de AAUQ

Tipo de asfalto	Teor de asfalto (%)	Pó de pedra (%)	MR a 10 °C		MR a 25 °C		MR a 40 °C		RT (MPa)	RT Desvio Padrão
			MR Médio (MPa)	MR Desvio Padrão	MR Médio (MPa)	MR Desvio Padrão	MR Médio (MPa)	MR Desvio Padrão		
30/45	5	0	3619	132	1385	58	643	155	0.44	0.03
			4661	522	2023	72	636	18	0.56	0.06
		3	4915	541	2087	193	691	79	0.49	0.03
			5521	376	2559	167	806	63	0.65	0.01
	7	0	4945	359	1521	91	365	32	0.67	0.02
			5541	688	1854	245	530	43	0.79	0.03
		3	5904	143	2094	367	596	45	0.64	0.05
			5660	782	2393	171	680	119	0.73	0.01
	9	0	3752	224	1372	162	667	101	0.73	0.06
			4298	659	1950	526	535	98	0.77	0.01
			5131	722	1901	128	558	59	0.68	0.00
			6109	511	1858	170	471	45	0.69	0.02
3		7915	242	4396	295	1955	254	0.82	0.07	
		5721	218	3369	330	1298	144	0.90	0.04	
		6141	398	3463	435	1540	94	0.84	0.04	
		8322	225	4573	281	2967	773	0.72	0.10	
5	0	7077	320	3713	145	1313	178	1.20	0.04	
		9909	340	5278	65	2479	252	1.03	0.10	
	3	9544	553	5172	199	1880	386	1.26	0.03	
		9784	393	5668	150	1932	116	1.60	0.01	
7	0	7711	351	3919	262	1196	150	1.34	0.06	
		9223	322	4310	215	1451	105	1.47	0.05	
	3	11365	227	6192	196	2509	150	1.59	0.07	
		9976	195	5198	278	1857	192	1.46	0.00	
TLA	9	3	10							

de 1% de ligante asfáltico reduz em 2% o Vv na mistura de AAUQ.

Também pode se observar nas Figuras 2a e 2b que a mistura de AAUQ com adição de 10% de agregado fino britado (AFB) e 3% de cal hidratada (CH) apresentou os menores valores de Vv para todos os teores de ligante asfáltico, tanto nas composições com CAP 30/45, como com TLA.

Os resultados de módulo de resiliência (MR) a 10 °C das AAUQ compostas por CAP 30/45 e TLA são apresentados na Tabela 2 assim como nas Figuras 3a e 3b, respectivamente. Na Figura 3a nota-se que as misturas com 7% de CAP 30/45 apresentaram os maiores valores de MR,

com exceção da mistura G-IV, na qual o maior MR foi obtido para 9% de ligante asfáltico. As misturas de AAUQ não apresentaram um comportamento claro, em função do incremento do teor de ligante asfáltico TLA, como mostra a Figura 3b. Contudo, foi notado que todas as misturas compostas por TLA apresentaram maiores valores de MR a 10 °C do que as misturas compostas com o CAP 30/45.

Os resultados de módulo de resiliência (MR) a 25 °C das AAUQ compostas por CAP30/45 e TLA são apresentados na Tabela 2 assim como nas Figuras 4a e 4b, respectivamente. Nas misturas de AAUQ com CAP 30/45, a adição de 10% de AFB, 3% de CH e a combinação destes aditivos, incrementaram o valor de módulo de resiliência

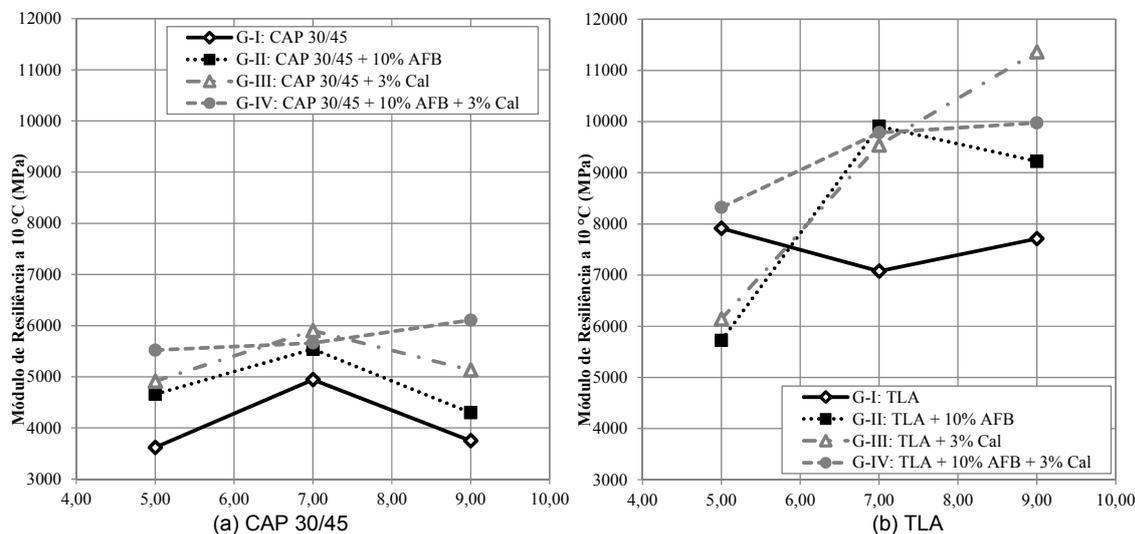


Figura 3. Módulo de Resiliência a 10 °C em função do teor e tipo de ligante asfáltico

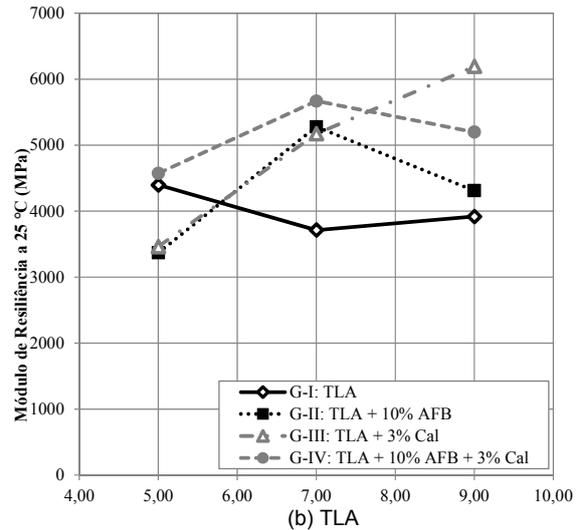
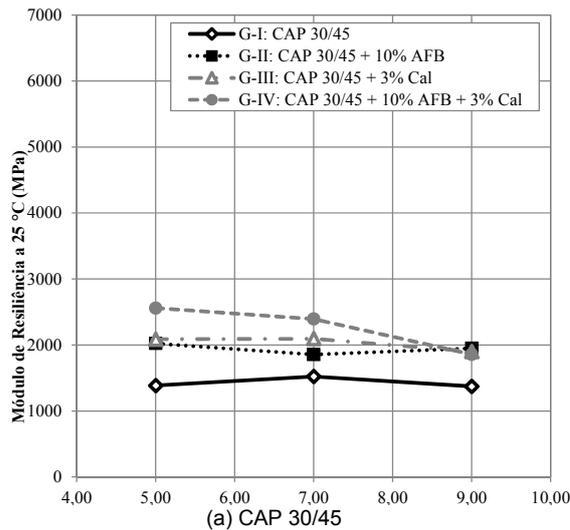


Figura 4. Módulo de Resiliência a 25 °C em função do teor e tipo de ligante asfáltico

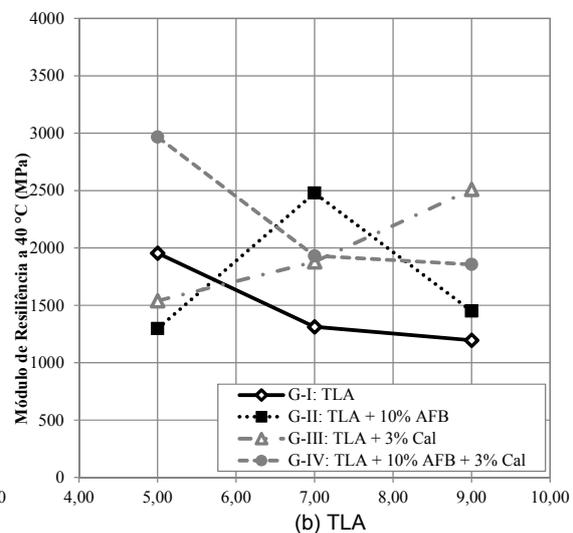
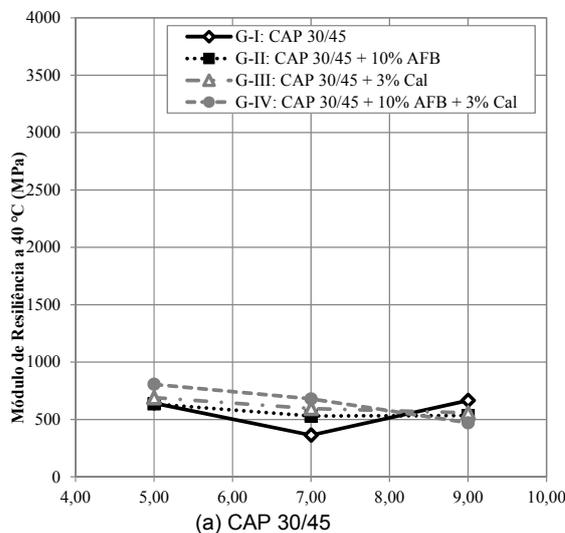


Figura 5. Módulo de Resiliência a 40 °C em função do teor e tipo de ligante asfáltico

para todos os teores de ligante asfáltico (Figura 4a). Essa tendência também foi observada nas misturas com adição de 7 e 9% de TLA, como mostra a Figura 4b. Assim como nos ensaios realizados a 10 °C, os maiores valores de MR a 25 °C foram observados nas misturas de AAUQ compostas pelo ligante asfáltico TLA.

O aumento do teor do ligante asfáltico CAP 30/45 reduziu o MR a 40 °C, com exceção da mistura sem adição de AFB e cal hidratada, como mostrado na Figura 5a. As misturas compostas por TLA não apresentaram um comportamento bem definido, em função do teor de ligante asfáltico (Figura 5b). De modo geral, as misturas de AAUQ com TLA apresentaram os maiores valores de módulo de resiliência a 40 °C para todos os teores de ligante asfáltico, quando comparadas com as misturas com CAP 30/45, como foi observado também nas temperaturas de 25 °C e 10 °C. Essa tendência mostra que o emprego de ligantes asfálticos mais consistentes influencia o valor de módulo de resiliência de misturas do tipo AAUQ.

Os resultados de resistência à tração (RT) por compressão diametral a 25 °C são apresentados na Tabela 2 assim como nas Figuras 6a, para o CAP 30/45, e 6b para o TLA. Nas misturas com TLA, os maiores valores de RT foram obtidos para o teor de 9% de ligante asfáltico, como mostra a Figura 6b. Já o incremento de ligante asfáltico nas

misturas de AAUQ com CAP 30/45, nem sempre produziu aumento da resistência à tração. As misturas G-I e G-III apresentaram os maiores valores de RT para o teor de 9% de CAP 30/45, enquanto que o teor de 7% de CAP 30/45 nas misturas G-II e G-IV conduziu às maiores resistências à tração.

Nas Figuras 6a e 6b ainda nota-se claramente a superioridade das misturas de AAUQ com ligante asfáltico TLA, em termos de resistência à tração, em relação às misturas compostas com CAP 30/45. Já a alteração na distribuição granulométrica das misturas de AAUQ não produziu um comportamento claro na resistência à tração. Nas misturas com o CAP 30/45, o maior valor de RT foi obtido na mistura G-II e teor de 7% de ligante asfáltico (Figura 6a). Também o teor de 7% de ligante asfáltico TLA conduziu à maior RT na mistura G-IV (Figura 6b).

Os resultados de recuperação, obtidos no ensaio de *creep* estático são apresentados nas Figuras 7a, para o CAP 30/45, e 7b para o TLA. Nessas figuras nota-se que não há um comportamento bem definido com relação à influência do teor de ligante asfáltico, tanto para o CAP 30/45, como para o TLA. Nas misturas compostas por CAP 30/45, a granulometria G-IV mostra melhor recuperação que as demais granulometrias. Já nas misturas com TLA, a mudança de granulometria não mostrou uma tendência

clara. Ainda nas Figuras 7a e 7b pode se notar que as misturas com TLA apresentam maior recuperação que as misturas com CAP 30/45.

O módulo de fluência das misturas com CAP 30/45 foi menor que o obtido nas misturas compostas por TLA, como mostram as Figuras 8a e 8b, respectivamente. O comportamento deste parâmetro, com relação à mudança de

granulometria da mistura AAUQ, foi similar ao comportamento obtido na recuperação, apresentado previamente.

4.2. Análise de variância dos resultados

Os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência à tração (RT) e *creep* estático

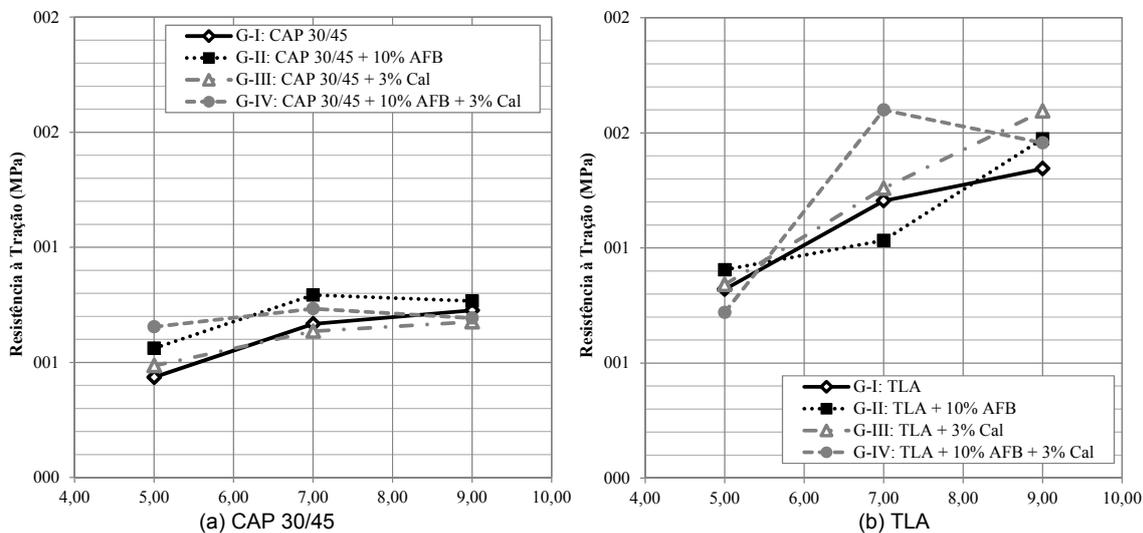


Figura 6. Resistência à tração a 25 °C em função do teor de ligante asfáltico

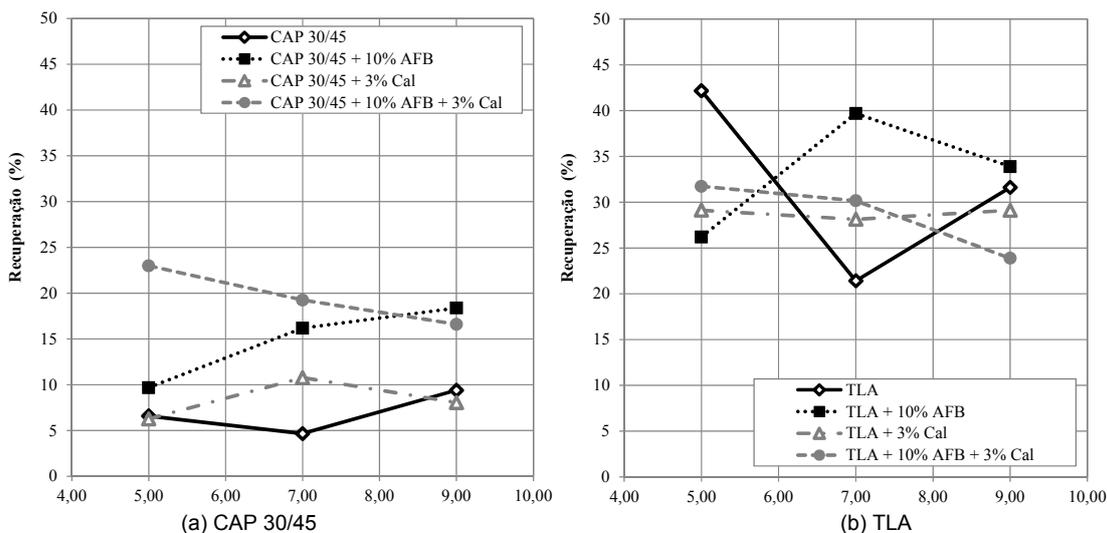


Figura 7. Recuperação obtida do ensaio de *creep* estático em função do teor e tipo de ligante asfáltico

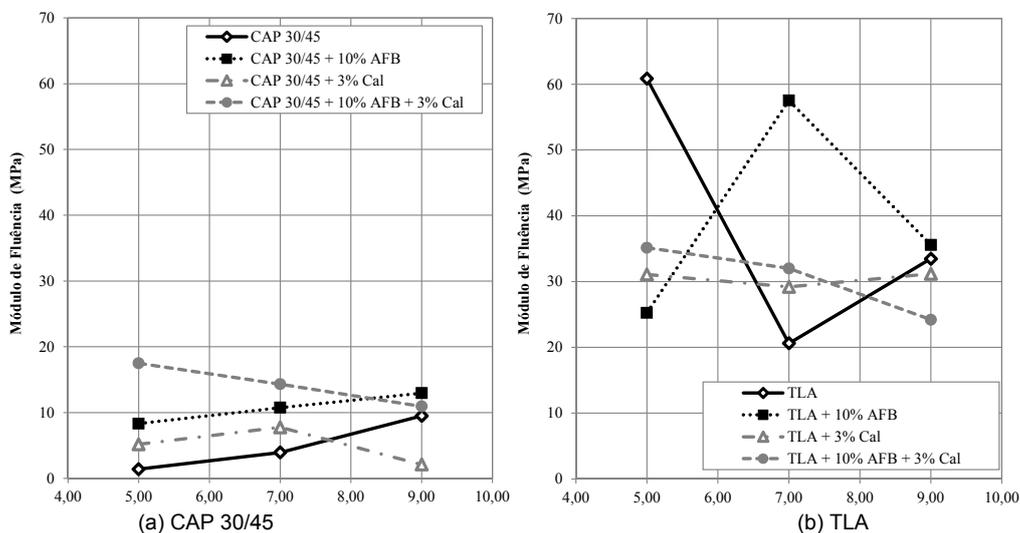


Figura 8. Módulo de fluência obtido do ensaio de *creep* estático em função do teor e tipo de ligante asfáltico

Tabela 3. Resultados da análise de variância das misturas de AAUQ

Fator / Interação	P (MR)	P (RT)	P (Recuperação)	P (Módulo de fluência)
Temperatura de Ensaio (A)	0,000	NA	NA	NA
Tipo de Ligante Asfáltico (B)	0,000	0,000	0,000	0,000
Teor de Ligante Asfáltico (C)	0,778	0,000	0,978	0,858
Agregado Fino Britado (D)	0,002	0,322	0,056	0,405
Cal Hidratada (E)	0,001	0,380	0,895	0,492
(A) x (B)	0,000	NA	NA	NA
(A) x (C)	0,973	NA	NA	NA
(A) x (D)	0,061	NA	NA	NA
(A) x (E)	0,005	NA	NA	NA
(B) x (C)	0,778	0,023	0,714	0,793
(B) x (D)	0,026	0,515	0,089	0,471
(B) x (E)	0,005	0,285	0,169	0,295
(C) x (D)	0,015	0,825	0,347	0,372
(C) x (E)	0,000	0,595	0,573	0,929
(D) x (E)	0,153	0,965	0,863	0,901

NA: Não aplicável

(recuperação e módulo de fluência), foram analisados estatisticamente através da análise de variância (ANOVA). Os fatores avaliados são apresentados na Tabela 3, assim como a interação entre eles. Vale notar que o Fator Temperatura de Ensaio (A), é válido apenas para o parâmetro MR, já que os ensaios de resistência à tração e de *creep* estático foram realizados apenas em uma temperatura, 25 °C e 40 °C, respectivamente.

A análise de variância foi realizada para uma significância de 95%, portanto o fator e/ou interação que apresenta valor de *P* inferior a 0,05 indica influência sobre a resposta mecânica avaliada. Assim, na Tabela 3, nota-se que o valor de MR é influenciado pelos fatores: temperatura do ensaio (A), tipo de ligante asfáltico (B), a adição de fino britado (D) e cal hidratada (E), sendo que o teor de ligante asfáltico (C), não foi influente. Já as interações influentes no MR foram: (A) x (B); (A) x (E); (B) x (D); (B) x (E); (C) x (D) e (C) x (E).

A resistência à tração (RT) é influenciada principalmente pelos fatores tipo de ligante asfáltico (B) e teor de ligante asfáltico (C). Nota-se na Tabela 3 que nem a adição de agregado fino britado (D) nem de cal hidratada (E) afetaram este parâmetro. A única interação significativa entre os parâmetros estudados na RT foi (B) x (C). Por outro lado, apenas o tipo de ligante asfáltico (B) afetou os valores de recuperação e módulo de fluência, obtidos do ensaio de *creep* estático.

4.3. Comparação dos resultados com propriedades de materiais usualmente empregados em bases de pavimentos

Em pavimentação, os materiais granulares e solos mais empregados na construção da camada de base são: a brita graduada simples (BGS), brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo arenoso fino laterítico (SAFL), solo agregado, solo cal, solo cimento, solo asfalto, entre outros.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), as bases constituídas por BGS apresentam valores de módulo de resiliência (MR), em média, entre 100 MPa e 400 MPa, de acordo com sua graduação, natureza dos agregados, estado de compactação e estado de tensões. Já o MR da BGTC é aproximadamente de 6.000 a 12.000 MPa e misturas de AAUQ, estudadas no Brasil, apresentam valores usuais de MR de 1.600 MPa até

2.000 MPa.

As pesquisas têm mostrado que o valor de módulo de resiliência do SAFL varia de 100 MPa a 500 MPa, ou até valores superiores, dependendo do tipo de solo laterítico, (Klinsky e Fabbri, 2009). O MR do solo cimento é muito maior, oscilando entre 5.000 MPa, até valores acima de 10.000 MPa (DER-SP, 2006). Já as misturas de solo cal usualmente apresentam módulo de resiliência entre 100 MPa até 5.000 MPa, dependendo das propriedades do solo estabilizado e do teor de aditivo empregado (Little, 1999).

Nota-se que os valores de módulo de resiliência (a 25 °C) obtidos neste estudo para as misturas de AAUQ variam de 2.000 MPa, para o ligante asfáltico CAP 30/45, até 6.000 MPa, para o ligante asfáltico TLA. Esses valores são similares aos obtidos em bases de solo cimento, solo cal e até brita graduada tratada com cimento. Elevados valores de MR usualmente indicam um material com baixa deformabilidade e com comportamento mecânico de bom a excelente para emprego em bases de pavimentos de baixo e médio volume de tráfego.

Por outro lado, o DER-SP (2006) recomenda valores de resistência à tração indireta no ensaio de compressão diametral superior a 0,7 MPa e inferior a 1,0 MPa, para BGTC aos 28 dias de cura. Pode se verificar neste trabalho que diversas misturas de AAUQ atendem a esta exigência e, à luz desse parâmetro, poderiam ser empregadas em bases de pavimentos.

Assim como Walker e Hicks (1976), que afirmam que as misturas do tipo AAUQ poderiam ser empregadas em camadas de base de pavimentos baixo e médio volume de tráfego, os resultados deste trabalho mostram que este tipo de mistura é apropriado para tal finalidade. Vale notar que as misturas do tipo areia asfalto usinado a quente requerem muito cuidado na execução, devido à elevada quantidade de ligante asfáltico e à presença de agregados de pequenas dimensões.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou algumas propriedades mecânicas de interesse à engenharia rodoviária de misturas de areia asfalto usinada a quente, compostas por areia de fundição residual, para seu emprego como bases de pavimentos. Os

resultados dos ensaios permitem tecer as seguintes conclusões:

- as misturas apresentaram elevado volume de vazios (V_v), contudo, teores maiores de ligante asfáltico e a adição de agregado fino britado e cal hidratada reduziram o V_v ;
- o módulo de resiliência é notavelmente sensível à temperatura; os maiores valores de MR foram observados a 10 °C e os menores, a 40 °C;
- a adição de agregado fino britado e cal hidratada mudou o comportamento das misturas de AAUQ, principalmente os resultados obtidos dos ensaios de *creep* estático, embora os resultados da análise estatística indicaram que estes fatores não são significativos na recuperação e no módulo de fluência; e
- as misturas com ligante asfáltico mais consistente, compostas com TLA, apresentaram valores maiores que os das misturas confeccionadas com CAP 30/45, para todos os parâmetros avaliados: MR, RT, Recuperação e Módulo de Fluência.

A norma DNIT 032/2005-ES (DNIT, 2005) apenas apresenta os parâmetros obtidos na metodologia Marshall, como requisitos para o projeto de mistura de areia asfalto usinada a quente, para ser utilizada como revestimento ou base de pavimento. Embora esses parâmetros não foram avaliados neste estudo, os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração e *creep* estático, mostram que as misturas de AAUQ apresentam características adequadas para serem utilizadas em bases de pavimentos de baixo volume de tráfego.

De maneira geral pode se concluir que as misturas de AAUQ apresentam uma boa alternativa para reutilizar a areia de fundição residual em grandes quantidades. Por exemplo, o emprego de uma base de AAUQ com 150 mm de espessura em um pavimento com 7,30 m de largura, representaria o reaproveitamento de 1.800 toneladas por quilometro construído.

Vale ressaltar que os ensaios ambientais devem ser executados regularmente nas misturas de AAUQ compostas por areia de fundição residual, para verificar se o encapsulamento do resíduo pelo ligante asfáltico elimina a possibilidade de poluição do meio ambiente, quando ela está presente no resíduo.

AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de doutorado concedida aos dois primeiros autores deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1991) *AASHTO M 145: Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ABIFA (2011) *Associação brasileira de fundição*. Disponível em: <www.abifa.org.br>. (Acesso em 01/08/2012).
- Akili, W. (1983) On the use of sulphur in sand-asphalt applications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 52. p. 561–584.
- Al-Abdul Wahhab, H. I. e I. M. Asi. (1997) Improvement of marl and dune sand for highway construction in arid areas. *Building and Environment*, v. 32, n. 3, p. 271–279. DOI: 10.1016/S0360-1323(96)00067-4.
- Aldiguieri, D.R. (2001) *Estudo de Misturas de Areia Asfalto Usinadas a Quente com asfaltos de diferentes consistências para revestimento de pavimentos no Estado do Ceará*. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Barksdale, R. D. (1980) Construction and performance of sand-asphalt bases. *Transportation Research Record*, n. 741, p. 13–22.
- Bernucci, L. B., L. M. G. da Motta, Ceratti, J. A. P. e J. B. Soares (2008) *Pavimentação Asfáltica, Formação básica para engenheiros*. Petróbras, ABEDA. Rio de Janeiro.
- BNDES (2011) *Indústria de fundição: situação atual e perspectivas*. Arquivo digital do BNDES Setorial 33, p. 121–162.
- Bonet, I.I. (2002) *Valorização do resíduo de areia de fundição (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.* Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Costa, C. J. B. da. (2008) *Mistura asfáltica com uso de areia de fundição de ferro descartada*. Dissertação (Mestrado). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Coutinho Neto, B. (2004) *Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Coz, A. F. (2001) *Comportamento ambiental de lodos de fundición estabilizados/solidificados*. Tese (Doutorado). Universidade de Cantabria, Santander, Espanha.
- De Hilster, E. e P. J. Van de Loo (1977) *The creep test: influence of test parameters*. Report, Shell Laboratories, Amsterdam, Holanda.
- DNIT (2005) *DNIT 032/2005 – ES. Pavimentos flexíveis – Areia Asfalto a quente – Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ.
- DER-SP (2006) *Projeto de pavimentação*. Instrução de Projeto. IP-DE-P00/001. São Paulo, SP.
- Edil, t. B. e G. H. Benson (2005) *Field Performance of Sub-Bases Constructed with Industrial Byproducts and Geosynthetic Reinforcement*. Final Report. Wisconsin Highway Research Program # 0092-45-18. University of Wisconsin-Madison.
- Fatani, M. N. e H. A. Sultan (1982) Dune sand-aggregate mixes and dune sand-sulfur mixes for asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record*, n. 843, p. 72–79.
- Hills, J. F. (1973) The creep of asphalt mixes. *Journal of the Institute of Petroleum*, v. 59, n. 570, p. 247–262.
- Javed, S. e C. W. Lovell (1995) Uses of Waste Foundry Sands in Civil Engineering. *Transportation Research Record*, n. 1486, p. 109-113.
- Klinsky, L. M. G. e G. T. P. Fabbri (2009) Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. *Transportes*, v. 17; n. 2; p. 36–45.
- Krukar, M. e J. C. Cook (1970) *Experimental Ring No. 4: A study of untreated, sand asphalt and asphalt concrete bases*. Report to the Washington Department of Highways on Research Project Y-993. Washington D.C.
- Little, N. D., J. W. Button e H. Youssef (1993) Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential. *Transportation Research Record*, n. 1417, p. 49–57.
- Little, N. D. (1999) *Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates*. vol. 1: Summary of findings. National Lime Association. Estados Unidos da América.
- Mazumdar, M. e Rao, S. K. (1993) Effect of comparative efforts on sand-asphalt-sulphur mixes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 12, n. 4, p. 916–919.
- Partridge, B. K., P. J. Fox, J. E. Alleman e D. C. Mast (1999) Field Demonstration of Highway Embankment Construction Using Waste Foundry Sand. *Transportation Research Record*, n. 1670, p. 98–105. DOI:10.3141/1670-13.
- Potts, C. F., B. E. Ruth e L. L. Smith (1980) Performance of Sand-Asphalt and Limerock Pavements in Florida. *Transportation Research Record*, n. 741, p. 22–34.
- Valkering, C. P., D. J. L. Lancon, E. de Hilster e D. A. Stoker (1990) Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer-modified binders. *Symposium – Improved Rut Resistance*, Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Proceedings, p. 590–609.
- Walker, F. K. e R. G. Hicks (1976) The use of sand asphalt in highway construction. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 45. p. 429–452.
- Warden, W. B. e S. B. Hudson (1960) Hot-mixed black base construction using natural aggregate. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. v. 30. p. 291–307.