

UTILIZAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO DE FERRO DESCARTADA COMO AGREGADO FINO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Clauber Costa, Mestrando.

clauber.costa@ibest.com.br

Salomão Pinto, D.Sc.

salomaopinto@ig.com.br

Luís Alfredo Ventrini, D.Sc.

lavorini@ime.eb.br

Álvaro Vieira, M.Sc.

alvaro@ime.eb.br

Instituto Militar de Engenharia - IME
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha
Rio de Janeiro (RJ) – CEP 22.290-270
Fone: +55213820-4124

RESUMO

Atualmente um dos principais problemas da indústria de fundição é a geração de grandes quantidades de resíduos, dentre eles as areias de fundição. Esse resíduo é disposto atualmente em aterros industriais e/ou comerciais, porém, pelos volumes gerados, torna-se cada vez mais cara e inviável a remoção como solução momentânea para sua destinação. Tais areias são oriundas dos diferentes processos de fundição e são distinguidas em dois tipos principais de areias de moldagem/macharia: “areia verde” e “areia ligada quimicamente”.

O trabalho objetiva avaliar o comportamento de misturas do tipo concreto asfáltico, obtidas a partir da adição de resíduo “areia verde” de fundição em substituição ao agregado fino convencionalmente utilizado (areia convencional). O comportamento das misturas foi caracterizado por meio de um programa experimental utilizando diferentes teores de rejeitos e alguns métodos de ensaio: dosagem Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga.

ABSTRACT

Nowadays, one of the most important problems in foundry industry is the waste generation. Casting sand is one of them. Currently, this waste is disposed at industrial or commercial landfills, however, due to huge generated volumes, such a destination has become more expensive and, consequently, not viable. Such sand comes from different casting processes and can be distinguished in two types: green sand and chemically joined sand.

In this way, the main goal of this research is to evaluate asphalt concrete mixtures containing green sand. The mixtures behavior was characterized by an experimental program taking into account different amount of casting sand in the mixture, and: Marshall design method, split tensile strength under controlled stress, resilient modulus and fatigue life.

1. INTRODUÇÃO

As indústrias de fundição brasileiras geraram de janeiro a outubro de 2006 aproximadamente 2.125.175 toneladas de produtos fundidos, sendo a região sudeste responsável pela maior produção, tendo a maior concentração no Estado de São Paulo (ABIFA, 2007).

A fabricação de peças fundidas precisa de grande quantidade de areia para confecção dos moldes e machos. O consumo de areia, dependendo do tipo de peça, varia aproximadamente de 800 kg a 1000 kg para cada 1000 kg de peças fundidas produzidas, aproximadamente. Essa areia normalmente é extraída de jazidas naturais de cava ou rios, com granulometrias diversas.

No preparo dos moldes, as areias são misturadas com um ligante que pode ser bentonita, outros aditivos e água, para obtenção da areia verde, utilizada na produção de peças de menor peso e tamanho. Por outro lado para a fabricação de peças maiores, geralmente são utilizados moldes e machos, constituídos por areia misturada com resina e catalisador, conferindo maior

resistência às peças. Além da areia verde, as empresas utilizam areia com resina fenólica, a qual dificultava a sua recuperação e reutilização, gerando grande quantidade de areia a ser descartada que, no passado, chegou a 1.000 t/mês.

Estima-se que empresas da indústria de fundição gerem cerca de 450 mil toneladas/ano de resíduos areias de fundição. Esta areia, após a etapa de desmoldagem, pode ser novamente inserida no processo de produção, com uma recuperação de aproximadamente 90 %. Os 10% restantes são liberados do processo, na forma de resíduo.

Segundo Bina (2002) os rejeitos industriais, materiais residuais de descarte do processo produtivo de qualquer indústria, devem ser controlados ou tratados para evitar sua transformação em contaminantes. Preocupados com os rejeitos não tratados e não administrados, os órgãos de controle ambiental trabalham no sentido de disciplinar sua destinação final, conforme Figura 1, evitando que contaminem os recursos naturais (ar, água e solo), e por consequência, o ser humano.



Figura 1: Depósito de rejeitos de areia de fundição (Tupy Fundições Ltda)

A possibilidade de reutilização da areia de fundição de descarte, além de evitar a sua disposição em aterros industriais e/ou comerciais, devolve-lhe algum tipo de valor para seu gerador ou para algum interessado que possa utilizá-la de forma adequada. Além disso, a reutilização da areia, descartada no processo de fundição, gera substancial economia de matéria prima, propiciando a conservação dos recursos naturais.

Segundo AFS (1991,1992), Baillod *et al.* (1991), Ham *et al.* (1990), McIntyre *et al.* (1991) *apud*. Hiltunen *et al.* (1992) os resíduos de areia de fundição podem ser usados como material único ou combinado com outros materiais para gerar um produto aceitável na indústria da construção. Estes resíduos também podem ser usados como base ou subbase para pavimentos de concreto de cimento portland e como fonte de sílica para produção de cimento portland. A areia de fundição também pode ser usada em combinação com outros materiais, como agregado fino, para a produção de cimento portland e concreto asfáltico convencional para pavimentação.

Existem grandes diferenças nos tipos e nas características dos vários rejeitos sólidos gerados na indústria, assim como também de aplicações para quais eles são adequados. Além disso, a experiência no uso dos rejeitos em pavimentação rodoviária pode variar consideravelmente dependendo das diferenças climáticas e dos procedimentos construtivos.

Atualmente o uso de rejeito de areias de fundição e/ou areia de descarte de fundição (RAF e/ou ADF) como agregado fino em misturas asfálticas a quente está bem documentado, mas

não muito praticado. A durabilidade dessa areia como um substituto do agregado fino usado na produção de misturas a quente é uma das determinantes principais de quanto tempo o pavimento asfáltico pode permanecer em serviço. A partir da década de 80, a *Federal Highway Administration*, [FHWA] desenvolveu um programa para avaliar várias possíveis fontes de agregado apropriados. Este programa de avaliação, conhecido como Superpave, foi aceito extensamente em especificações asfálticas. As areias de fundição são mais finas do que areias convencionais utilizadas em misturas asfálticas, mas satisfarão as exigências do programa Superpave, quando projetadas corretamente.

Segundo a FHWA - *Federal Highway Administration*, (2004) a areia de fundição tem sido usada com sucesso para substituir uma parcela do agregado fino que é usado em misturas asfálticas convencionais. Os estudos mostraram que essa areia de fundição pode ser usada para substituir entre 8 e 25% do agregado fino. As misturas do asfalto que contêm a areia de fundição podem ser projetadas usando métodos de projeto padrão como o Marshall e Hveem. Assim a areia de fundição pode ter um alto benefício-custo para a indústria de fundição bem como para a indústria de construção rodoviária.

Segundo Ciesielki *et al.*, *apud* Pereira (2005), o programa americano de pesquisa em prática rodoviária também realizou testes utilizando areias de fundição como subprodutos em pavimentos asfálticos. O desempenho foi satisfatório em pavimentos projetados com misturas betuminosas usinadas à quente, incorporando até 15% de resíduo “areia verde” de fundição na mistura de agregados. Com o uso de um percentual maior, as amostras foram suscetíveis à umidade devido ao desprendimento da película de asfalto das partículas de agregados em função da natureza hidrófila do RAVF (rejeito de areia verde de fundição), ocorrendo a perda do agregado fino da mistura e a deterioração acelerada do pavimento. Entretanto, foi verificado que o problema pode ser resolvido utilizando aditivos.

Demirbas *et al.*, (2006) realizaram pesquisa para avaliar o potencial do uso de areia de fundição descartada em misturas asfálticas, como substituto parcial de areia natural, sendo o material utilizado para o estudo o da empresa de fundição de Bozuyuk, Turquia. Como resultado, das experiências realizadas em amostras de concretas asfáltico, pode-se concluir que a adição de resíduos em quantidades maiores que 10% diminui a estabilidade Marshall significativamente, de 12.10 kN com 0% RAF para 10.90 kN com o 10% FAF adicionado. Assim o autor sugere que para uso prático, a parcela de RAF como um subproduto no concreto asfáltico deva ser limitada em aproximadamente 10%.

No Brasil Bina *et al.*, *apud* Coutinho Neto, (2004) realizaram um estudo utilizando areia de fundição descartada em pavimentação asfáltica armada. A pavimentação asfáltica armada é uma técnica relativamente nova e segundo o autor seria a melhor opção para a utilização de areia de fundição de descarte. Esta tecnologia consiste na colocação de uma camada composta de tela de aço e lama asfáltica (1 a 1,5 cm de espessura) entre duas camadas de concreto asfáltico, sendo a camada inferior com espessura de 5 a 12 cm e a superior, de 5 a 7 cm. Segundo os autores, dentre várias vantagens tem-se um maior desempenho e durabilidade, quanto à perda de capacidade de suporte das camadas inferiores, pois possibilita maior distribuição das tensões provocadas pelo carregamento em virtude de uma melhor distribuição da carga.

Assim sendo, este trabalho objetiva avaliar o comportamento de misturas asfálticas a quente,

obtidas a partir da adição de resíduo “areia verde” de fundição em substituição ao agregado fino convencionalmente utilizado (areia de rio ou cava).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico usado no presente estudo é proveniente da refinaria Paulínia (Replan), classificado por penetração como do tipo 50/60 na classificação antiga e 50/70 na classificação de 2005, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização do Ligante (CAP)

Características	Limites CAP 50 - 70	Ligante Estudado
Penetração (0,1mm)	50 – 70	54
Ponto de Amolecimento, min. (°C)	46	48
Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C, min.,(s)	141	170
Viscosidade Saybolt-Furol a 150°C, min.,(s)	50	84
Viscosidade Saybolt-Furol a 177°C, min.,(s)	30 - 150	-
Índice de susceptibilidade térmica	(-1,5) a (+0,7)	-1,50
Ponto de Fulgor, min. (°C)	235	-
Solubilidade em tricloroetileno, min., (% massa)	99,5	-
Ductilidade a 25°C, min. (cm)	60	>100
Efeito do Calor e do ar após FTFOT a 163° C, 85 min		
Varição em massa, máx (%)	0,5	-
Ductilidade a 25°C, min. (cm)	20	-
Aumento do Pto de Amolecimento, máx (°C)	8	-
Penetração Retida	55	-

Foram medidas as viscosidades Saybolt-Furol nas temperaturas de 135°C, 145°C e 155°C. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios.

Tabela 2: Resultados do ensaio Saybolt-Furol

Tempertura (°C)	135°C	145°C	155°C
CAP 50/70 (VSF)	170	100,8	66,8

A Tabela 3 apresenta a temperatura do ligante na moldagem dos corpos-de-prova para determinação do teor de projeto. A figura 3 apresenta a relação viscosidade versus temperatura °C, obtida no ensaio de caracterização do ligante.

Tabela 3: Temperaturas utilizadas na moldagem dos corpos-de-prova para determinação do teor de projeto.

Tempertura do ligante (°C)	150
Temperatura dos agregados (°C)	165
Temperatura de compactação (°C)	139

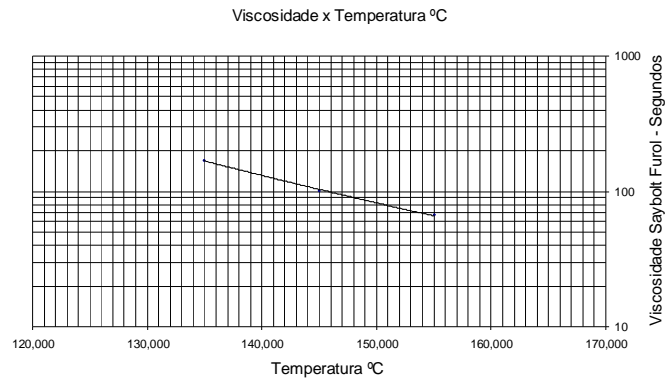


Figura 2: Viscosidade x Temperatura °C, para o CAP deste estudo

2.2 Agregados

Das empresas geradoras do resíduo de areia de fundição foram escolhidas aquelas com maior potencial de descarte. As amostras do RAF, aquelas denominadas de areias de caixa de moldagem (areia verde), conforme Figura 3, ou do tipo misturado (descarte de areia de caixa de moldagem - areia verde, com areia dos moldes internos – areia de macharia, e também com areia proveniente da etapa de acabamento superficial – jato de areia) foram coletadas em pontos determinados conforme as exigências da norma NBR 10.007 - Amostragem de Resíduo Sólido (ABNT, 1987).



Figura 3: Aspecto físico do RAF/ADF (areia verde)

Para os demais agregados componentes das misturas asfálticas, como por exemplo, a Brita n.º 1, o Pedrisco, o Pó de pedra, foram adquiridas quantidades conforme exigências da norma DNER PRO 120/97, a DNER PRO 199/96 e a NBR 7216 através da empresa Jofege Pavimentação e Construção Ltda., sendo a Brita n.º 1 procedente da pedreira Basalto V, e o Pedrisco e Pó de pedra da pedreira Basalto II de natureza mineralógica basáltica. A Tabela 4 e Figura 4 mostram a análise granulométrica dos agregados usados nesta pesquisa.

Tabela 4: Análise granulométrica dos agregados (% passante)

PENEIRAS	<i>Diâmetros</i>	Brita 1	Pedrisco	Pó + Pedrisco	R.A.F (TUPY)	R.A.F (FAGOR)	Areia VIRGEM
3 pol	76,2	100	100	100	100	100	100
2 pol	50,8	100	100	100	100	100	100
1 1/2 pol	38,1	100	100	100	100	100	100
1 pol	25,4	100	100	100	100	100	100
3/4 pol	19,1	99	100	100	100	100	100
1/2 pol	12,7	61	100	100	100	100	100
3/8 pol	9,5	18	100	100	100	100	100
Nº 4	4,8	1	29	98	100	100	100
Nº 10	2	1	2	65	100	100	98
Nº 40	0,42	1	2	27	77	92	13
Nº 80	0,18	1	2	19	17	13	5
Nº 200	0,074	1	2	12	4	1	1

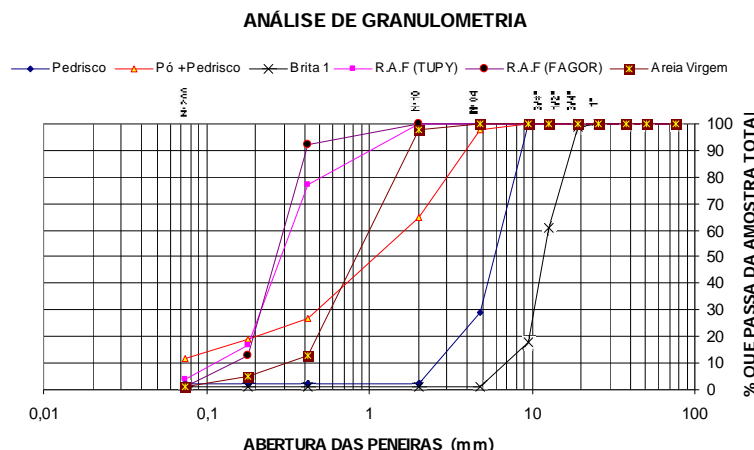


Figura 4: Granulometria dos agregados utilizados neste estudo.

3. DOSAGEM DA MISTURA

As porcentagens máximas e mínimas dos agregados empregados na mistura foram determinadas de acordo com as especificações DNIT 031/2006 – ES, adotando-se a faixa “C”, destinada à capa de rolamento. Para a dosagem da mistura foi adotado o método Marshall (DNER-ME 043/95), comumente utilizado em projetos de mistura de concreto asfáltico – C.A.

Para a incorporação dos resíduos de areia de fundição às massas asfálticas, as normas supracitadas estabelecem critérios que visam estabelecer a quantidade ideal de resíduo a ser incorporado ao concreto asfáltico e/ou outras misturas e encontrar a granulometria adequada para a manutenção das características desejadas às misturas asfálticas, como por exemplo, a percentagem de vazios (%Vv) e relação betume vazios (%RBV).

3.1 Granulometria

Foram incorporados dois diferentes teores de RAF às misturas asfálticas (Mistura TUPY com 10 % e Mistura FAGOR com 8%). Para o CA TUPY, conforme tabela 6, foram utilizadas as seguintes porcentagens de materiais: 25 % de brita 1; 30 % de pedrisco; 35 % de pó+pedrisco e 10 % de RAF/ADF. A Tabela 5 e Figura 5 mostram que a composição granulométrica e a curva de distribuição granulométrica obtida enquadraram-se na Faixa “C” determinada, respectivamente.

Tabela 5: Composição granulométrica obtida para CA TUPY

Peneira	Abertura (mm)	% em Peso, passando Faixa “C” DNIT	CA c/ 10% R.A.F. (TUPY)
3/4 pol	19,1	100	100
1/2 pol	12,7	80-100	90
3/8 pol	9,5	70-90	80
Nº 4	4,8	44-72	53
Nº 10	2	22-50	34
Nº 40	0,42	8.-26	18
Nº 80	0,18	4.-16	9
Nº 200	0,074	2.-10	5

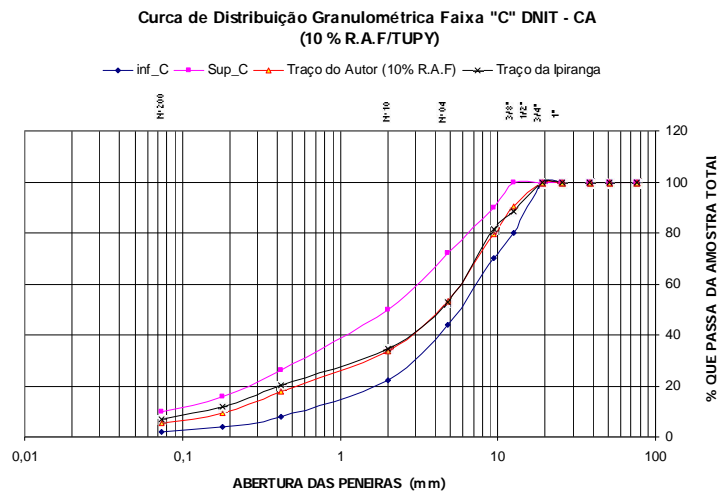


Figura 5: Enquadramento da Mistura na Faixa “C” DNIT

Tabela 6: Composição da Mistura – Faixa “C” DNIT

TEOR ÓTIMO (TUPY)				
CP (g)	1200	Separação dos Agregados em Frações		
Material	Traço	Intervalo	% Intervalo	Mistura (g)
Brita n.º1	23,68%	1"-1/2"	39%	110,8
		1/2"-3/8"	43%	122,16
		Pass 3/8"	18%	51,14
Pedrisco	28,41%	3/8"-Nº4	71%	242,05
		Pass Nº4	29%	98,87
Pó+Pedrisco	33,15%	3/8"-Nº4	35%	139,21
		Pass Nº10	65%	258,53
RAF (TUPY)	9,47%			113,64
CAP (g)	5,30%			63,6
TOTAL (g)	100%			1200

Para a mistura de CA FAGOR, conforme Tabela 8, foram utilizadas as seguintes porcentagens de materiais: 25 % de brita n.º 1; 30 % de pedrisco; 37 % de pó+pedrisco e 8 % de RAF/ADF. A Tabela 7 e a Figura 6 mostram que a composição granulométrica e a curva de distribuição granulométrica obtida enquadraram-se na Faixa “C” determinada, respectivamente.

Tabela 7: Composição granulométrica obtida para CA FAGOR

Peneira	Abertura (mm)	% em Peso, passando Faixa "C" DNIT	CA c/ 8% R.A.F (FAGOR)
3/4 pol	19,1	100	100
1/2 pol	12,7	80-100	90
3/8 pol	9,5	70-90	80
Nº 4	4,8	44-72	53
Nº 10	2	22-50	33
Nº 40	0,42	8.-26	18
Nº 80	0,18	4.-16	9
Nº 200	0,074	2.-10	5

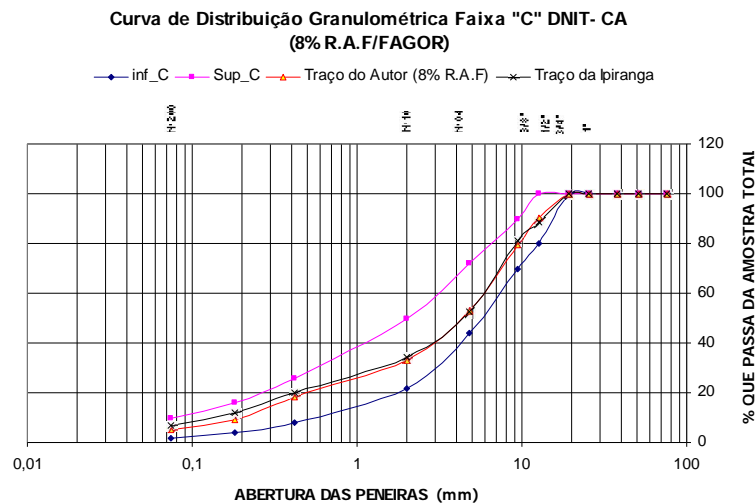


Figura 6: Enquadramento da mistura na Faixa “C” DNIT

Tabela 8: Composição da Mistura – Faixa “C” DNIT

TEOR ÓTIMO (FAGOR)				
CP (g)	1200	Separação dos Agregados em Frações		
Material	Traço	Intervalo	% Intervalo	Mistura (g)
Brita n.º1	23,68%	1"-1/2"	39%	110,82
		1/2"-3/8"	43%	122,2
		Pass 3/8"	18%	51,15
Pedrisco	28,41%	3/8"-Nº4	71%	242,05
		Pass Nº4	29%	98,87
Pó+Pedrisco	35,03%	3/8"-Nº4	35%	147,13
		Pass Nº10	65%	273,23
RAF (FAGOR)	7,58%			90,96
CAP (g)	5,30%			63,6
TOTAL (g)	100%			1200

Com a finalidade de confeccionar corpos-de-prova com melhor distribuição granulométrica, os agregados foram particionados em oito frações, conforme ilustra a Figura 7. Para a execução de cada corpo-de-prova, foi pesada individualmente cada uma das oito frações de agregado. Todas as frações são oriundas do peneiramento da brita n.º1, pedrisco, pó de pedra + pedrisco e o RAF/ADF.



Figura 7: Frações dos agregados usados neste estudo.

Após a determinação do teor de projeto foram confeccionados corpos-de-prova destinados aos ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e fadiga. A Tabela 9 mostra a quantidade de corpos-de-prova totalizando 36 unidades moldadas e ensaiadas.

Tabela 9: Quantidade de corpos de prova para ensaios mecânicos

Misturas	Ensaio Mecânico		
	RT (MPa)	MR (MPa)	Fadiga (TC)
CA TUPY c/ 10% RAF	3	3	12
CA FAGOR c/ 8% RAF	3	3	12

4 ENSAIOS REALIZADOS

Nos corpos-de-prova moldados no Laboratório do Instituto Militar de Engenharia e Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IME/IPR), foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral (DNER-ME 138/94), módulo de resiliência de misturas asfálticas (DNER-ME 133/94), e fadiga à compressão diametral à tensão constante (Pinto, 1991). Todos estes ensaios foram realizados na temperatura de 25 °C.

Para determinação da resistência à tração e módulo de resiliência foram realizados, para cada mistura, ensaios com três corpos-de-prova cilíndricos. Para o cálculo do módulo foi usado o valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson (μ). A análise da vida de fadiga para as misturas asfálticas foi feita em cp's cilíndricos com condição de carga dinâmica à tensão controlada (TC) por compressão diametral à tração indireta, à frequência de 1Hz e tempo de carregamento de 0,1s, com as cargas verticais induzindo tensões de tração horizontais no centro da amostra com 10%, 20% 30% e 40% da resistência à tração estática, com três corpos-de-prova para cada nível de tensão.

A Tabela 10 mostra os valores encontrados para as características da mistura com teor de ligante de projeto de 5.3% (CA TUPY e CA FAGOR) em comparação com o preconizado na norma DNIT 031/2004-ES.

Tabela 10: Parâmetros físicos e mecânicos das misturas asfálticas estudadas / Faixa “C” - DNIT

Características	Capa de Rolamento (DNIT 031/2006 - ES)	CA TUPY 5.3% CAP	CA FAGOR 5.3% CAP
Porcentagem de vazios (%)	3 a 5	3,8	4,08
Relação Betume/vazios (%)	75 - 82	78,00	77,00
Estabilidade mínima (kgf)	500	916,00	942,00
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática à 25°C, mínima (MPa)	0,65	0,92	0,95

A Tabela 11 apresenta os resultados médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas analisadas.

Tabela 11: Resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas estudadas

Misturas	RT à 25° C Média (MPa)	S (MPa)
CA TUPY c/ 10% RAF	0,92	0,04
CA FAGOR c/ 8% RAF	0,95	0,02
PINTO (1991)	0,62	0,03

O procedimento para obtenção do módulo de resiliência consistiu na determinação de três valores do módulo durante a realização de três ciclos de ensaio para cada corpo-de-prova. Cada ciclo foi composto por uma quantidade determinada de golpes de condicionamento e dez golpes para a determinação do módulo. Para o primeiro ciclo, foram aplicados quarenta golpes de condicionamento e, para os dois últimos ciclos, dez golpes de condicionamento.

Observa-se que das misturas estudadas a que apresentou maior valor de MR, assim como maior MR/RT, foi à mistura CA TUPY, apesar do mesmo teor de ligante entre as duas misturas estudadas. Entretanto, os valores encontrados estão compatíveis com o tipo de ligante empregado.

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados dos módulos de resiliência (MR), os valores da resistência à tração estática das misturas (RT) e a relação (MR/RT). Os valores encontrados de MR e RT para CA TUPY e CA FAGOR não se encontram muito distantes daqueles apresentados por PINTO, (1991), mostram-se compatíveis com os valores normalmente encontrados no catálogo de curvas de fadiga divulgados pela ABPv, atualizado por Motta *et al.*, (2002), fruto do trabalho de Pinto e Motta (1995), conforme Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 12: Resultados do módulo de resiliência (MR) e relação MR/RT das misturas experimentais.

Misturas	Teor de ligante de Projeto %	MR Médio (MPa)	RT Média (MPa)	MR/RT
CA TUPY c/ 10% RAF	5.3	3987	0.92	4333,7
CA FAGOR c/ 8% RAF	5.3	3179	0.95	3346,32
PINTO (1991)	-	4020	0,62	6483,87

Tabela 13: Características físicas e mecânicas dos concretos asfálticos. Motta *et al.*, 2002.

CAP	Pen	% CAP	Faixa	Dap	%V.v	% RBV	RT 25°C MPa	MR 25°C MPa
50/60	56	5.4	C - DNIT	2,34	4,4	73,0	0,95	2516
50/60	56	5.9	C - DNIT	2,33	3,7	78,3	0,89	3033
50/60	54	6.0	C - DNIT	2,37	3,7	79,6	0,86	3900
50/60	56	6.3	C - DNIT	2,33	4,5	72,0	1,07	3511

Tabela 14: Características mecânicas e de fadiga à tensão controlada de misturas (capa de rolamento de CA). Pinto, 1991.

Am	CAP	Petróleo	MR 25°C (MPa)	S (MPa)	RT 25°C (MPa)	S (MPa)	N = K ₁ (1/) ^{n₁} (Mpa)		
							K ₁	n ₁	R ²
1	50/60	Bachaquero	3920	270	0,63	0,04	1,2 x 10 ³	2,77	0,97
2	50/60	Mistura	4020	330	0,62	0,03	1,97 x 10 ³	2,86	0,96
3	30/45	Árabe Leve	5950	390	1,,04	-	5,63 x 10 ³	2,65	0,99
4	20/45	Árabe Leve	14300	1950	1,87	0,05	5,32 x 10 ⁴	2,88	0,94
5	55	Mistura	5140	410	1,06	0,1	3,59 x 10 ³	2,32	0,97
6	20	Mistura	3520	290	0,81	0,05	1,31 x 10 ³	2,61	0,98

A Tabela 15 mostra as equações geradas nos ensaios de fadiga expressas como uma função da diferença de tensões () inicial em MPa e seus coeficientes (K₁ e n₁). A Figura 8 mostra os gráficos das relações obtidas entre a vida de fadiga versus diferença de tensões das misturas. Observa-se boa correlação entre os pontos experimentais e as curvas ajustadas, pelos valores de coeficientes de determinação superiores a 0,90 nas duas misturas analisadas. Verifica-se também que o comportamento à fadiga do CA FAGOR é melhor que o observado na mistura CA TUPY à medida que decresce o nível de tensão, embora não seja conveniente se analisar

diretamente curvas de fadiga de misturas distintas fora do contexto de uma análise envolvendo toda a estrutura do pavimento quando os valores de MR são diferentes.

Tabela 15: Características de fadiga à tensão controlada das misturas asfálticas estudadas

Misturas	CAP	$N = K_1 (1/\sigma)^{n_1}$		R^2
		K_1	n_1	
CA TUPY c/ 10% RAF	50/70	1093,2	2,30	0,96
CA FAGOR c/ 8% RAF	50/70	1715,3	3,25	0,97
PINTO (1991)	50/70	$1,97 \times 10^3$	2,86	0,98

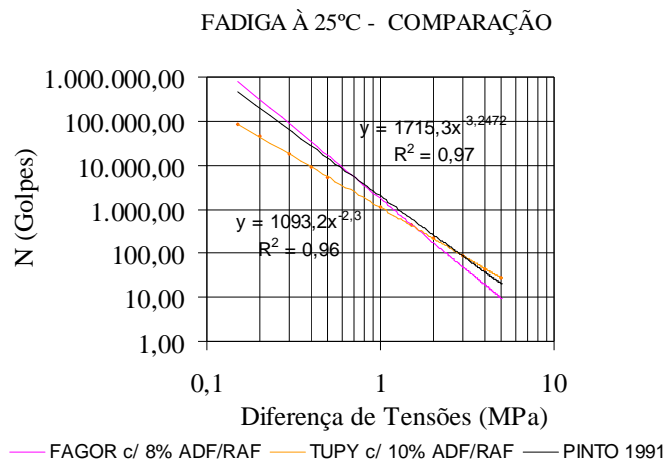


Figura 8: Vida de fadiga **versus** diferença de tensões (MPa)

5. CONCLUSÕES

Conclui-se com base nos resultados obtidos em laboratório, que existe a viabilidade técnica para o uso de areia de fundição de ferro descartada em substituição a agregados finos em massa asfáltica para pavimentação. Embora os resultados sejam ligeiramente diferentes, são todos aceitáveis do ponto de vista mecanístico. Entretanto, este estudo será complementado levando-se em consideração aspectos mecanísticos de comportamento e desempenho da pista experimental localizada no município de Extrema-MG (verificação em condições reais, sob atuação de cargas do tráfego, variações climáticas de temperaturas e efeito da umidade) bem como sua avaliação ambiental referente à NBR 10004 - classificação de resíduos, conforme programado no prosseguimento da pesquisa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ilmo Sr. Chequer Jabor Chequer coordenador do Instituto de Pesquisa Rodoviário – IPR/DNIT em conceder o espaço do laboratório de misturas asfálticas desta instituição dando grande apoio a este estudo. O primeiro autor agradece ao laboratorista Sérgio Romário pela ajuda e incentivo nos ensaios de misturas asfálticas, as empresas Tupy Fundições Ltda. e Fagor Ederlan Brasileira Ltda. pelo fornecimento do rejeito de areia de fundição (areia verde) e ao diretor técnico da Empresa Monobeton, Eng.º Paulo Bina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 10.004. (1987a) *Resíduos Sólidos – Classificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p.33.
- ABIFA, (2007). Capturado em http://www.abifa.com.br/indices_de_mercado.php_abril/2007.
- ABNT NBR 10.007. (1987d). *Amostragem de Resíduos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p.25.

- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7216. *Amostragem de Agregado – Método*: sem data.
- BENEVIDES, S. A. S. (2000). *Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Estado do Ceará*. Rio de Janeiro.
- BONET, Ivan Iderado. (2002). *Valorização do resíduo areia de fundição (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ*. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia. Florianópolis.
- BINA, Paulo. (2002). *Metodologia de utilização de rejeitos industriais na pavimentação: estudo de caso de uso de areia de fundição*. Mestrado Profissional em Habitação (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). São Paulo –SP.
- COUTINHO NETO, Benedito. (2004). *Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas*. 304 p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco.(2004) *Caracterização de Misturas Asfálticas Com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado*. [Rio de Janeiro] 2004 XVIII, 135 p. (COPPE/UFRJ, M.Sc.,Engenharia Civil)
- DNER (1995) ME 043 – *Misturas betuminosas à quente – Ensaio Marshall*. Rio de Janeiro.
- DNER (1997) PRO 120 – *Coleta de Amostras de Agregados*. Rio de Janeiro.
- DNER (1996) PRO 199 – *Redução de Amostras de Campo de Agregados para ensaio de laboratório*. Rio de Janeiro.
- DNER (1998) ME 083 – *Agregados – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.
- DNER (1994a) ME 138 – *Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994b) ME 133 – *Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência*, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT ES – 031/2006 *Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico*. Rio de Janeiro.
- DEMIRBAS, Ayhan; Koyuncu Hakan. (2006). *An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures*. *Waste Management Research* 2006; 24; 269.
- Federal Highway Administration Environmental Protection Agency (2004). *Foundry Sand Facts for Civil Engineers* Washington, DC.
- HILTUNEN D., ROQHE R. and WU X. (1992). *Beneficial Reuse of Foundry Residual Wastes Pennsylvania: Physical Characterization of Materials*. Pennsylvania State University.
- MARIOTTO, C.L. (1984). *Areias de Fundição: Alguns Desenvolvimentos e Perspectivas*, Comunicação Interna 134 - 16 pag.– IPT - São Paulo.
- MOTTA, L. M. G., MEDINA, J., SOUSA, A. M. (2002). *Características de fadiga e resiliência de concretos asfálticos brasileiros*. 16º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP), Rio de Janeiro.
- PEREIRA, Raquel Luísa. (2005). *Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas*. Relatório preliminar apresentado ao Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas. UFPR, 2005.
- PINTO, S. e MOTTA. L. M. G da (1995). *Catálogo de Curvas de Fadiga. Boletim Técnico nº 16 da ABPv*.
- PINTO, S. (1991). *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- SOARES, J. B., L. M. G. Motta, J. A Paiva, & J. V. Castelo Branco (2000). *Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Variação de Granulometria e de CAP*, 150. Encontro de Asfalto do IBP, Rio de Janeiro-RJ.