

ANÁLISE LABORATORIAL DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia¹

Liseane Padilha Thives¹

Kátia Aline Bonh¹

José Antônio Santana Echeverria²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

² Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul

Departamento de Engenharia Civil

RESUMO

Cerca de 60% dos resíduos sólidos das indústrias de fundição é areia, classificada como perigosa (Classe I), representando grande desafio no descarte adequado. Este estudo apresenta uma análise laboratorial para reutilização deste material em misturas asfálticas. Foram avaliadas cinco misturas, uma convencional e as demais contendo 5% da areia de fundição dos tipos: verde, macharia, IMF e pó do exaustor. Para determinação do comportamento mecânico avaliou-se a perda de massa, resistência à tração, dano por umidade induzida e módulo resiliente. Como resultado geral, as misturas com areias apresentaram ganhos de resistência à tração e módulo resiliente em relação à convencional. Quanto ao dano por umidade induzida, houve redução nas misturas com areias de macharia e verde. A areia com pó do exaustor foi a que obteve melhor desempenho geral. De acordo com o ensaio de lixiviação, as misturas com areias podem ser utilizadas pois não contaminam o meio ambiente.

ABSTRACT

About 60% of solid waste from foundry industries is sand, classified as hazardous (Class I), posing a major challenge in proper disposal. This study presents a laboratory analysis for reuse of this material in asphalt mixtures. Five mixtures were evaluated, one conventional and the others containing 5% of foundry sand of the types: green, macharia, IMF and exhaust dust. To determine the mechanical tests, mass loss, tensile strength, moisture induced damage and resilient modulus were evaluated. As a general result, sand blends exhibited tensile strength and resilient modulus gains compared to conventional. As for moisture induced damage, there was a reduction in the mixtures with sands of macharia and green. The powdered sand that obtained the best overall performance was with exhaust dust. According to the lixiviation test, sand mixtures can be used as they do not contaminate the environment.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de fundição produz uma variedade de peças fundidas em ferro, aço e ligas não ferrosas. Entre as matérias primas utilizadas, destacam-se, o ferro gusa, o alumínio e as ferroligas. Existem várias técnicas de fundição com estes materiais, sendo a que utiliza moldes de areia, a mais comum. Após passagem por moldes os materiais dão origem as peças automotivas e de diversas áreas da indústria. Os principais resíduos sólidos do processo de fundição são metais (constituição das peças) e areias de fundição (utilizadas como molde). Segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) a maioria destes resíduos enquadram-se como Classe I (perigosos), por conterem metais que contaminam o ar, solo e mananciais próximos às áreas de depósito.

Relativamente as areias, as aglomeradas com resinas fenólicas são prejudiciais uma vez que ao serem depositada em aterros, podem tornar o solo infértil e ao serem levadas pelas águas, podem contaminar mananciais. Desta forma, assim como qualquer resíduo industrial, as areias provenientes de fundições devem ser depositadas de forma adequada ou reutilizadas (KLINSKY, 2013).

O Brasil ocupa a sétima posição mundial do setor fundiário e por suas condições naturais e reservas, apresenta grande potencial de crescimento. No período de 2005 a 2015, a produção fundiária foi, em média, de 3 milhões de toneladas (ABIFA, 2016). No entanto, apenas 22% dos resíduos de fundição recebem destino ou descarte ambientalmente adequado. Em média, 16% são depositados em aterros, 1% e 5% coprocessados. O restante, 78%, são descartados de maneira irregular, acarretando danos ao meio ambiente, uma vez que não há controle sobre seu depósito (ABETRE, 2013).

Os processos mais utilizados para obtenção de uma peça fundida são a fundição em areia e em coquilha (molde metálico). A fundição em areia, mais utilizada, consiste na obtenção da peça metálica a partir de um molde (forma) fabricado em areia. No processo em coquilha, o molde é feito em metal, normalmente em aço. As areias utilizadas para obtenção das formas podem ser areias com ligantes químicos (areias especiais), areia seca e areia verde, sendo esta última, o tipo de areia mais utilizado (SOUZA, 2004).

Previamente à utilização como molde de peças fundidas, as areias são tratadas por compostos químicos, os quais são especificadas pela empresa em função do tipo de areia. Quando descartadas, essas areias podem ser reincorporadas a materiais não reagentes. Nesta forma, assumem comportamento inerte quando à toxicidade e lixiviação, não causando danos ao meio ambiente (MME, 2009). As areias descartadas pelos moldes não permanentes constituem os resíduos sólidos de fundição e por isso recebem comercialmente a nomenclatura de areias de fundição.

Durante o processo de confecção das peças metálicas, a areia passa por diferentes processos (recebimento de resina, mistura e queima) e acaba adquirindo novas denominações e granulometrias. A partir da mudança estrutural da areia verde, ela torna-se areia de fundição e recebe o nome correspondente ao processo que foi gerada (ABIFA, 2016).

Com o objetivo de resistir às altas temperaturas e dar forma às peças fundidas, a areia de macharia (AMA) é misturada com resinas hidrofugante, desta forma adquire maior resistência aos moldes pela interação com as ligas ferrosas. A areia IMF (AIMF) é gerada por processos secundários de moldagem, sendo coletada após a passagem pelo misturador contínuo com moldagem em resina do tipo IMF - NO BAKE® (Instalações e Máquinas para Fundição). A areia pó do exaustor (APÓ) apresenta o menor diâmetro dos grãos e é coletada junto ao exaustor (anterior ao descarte final) e após decorrentes processos de queima.

A areia de fundição, por se tratar de um material originalmente mineral, possui grande similaridade física ao agregado fino utilizado nas misturas asfálticas a quente. Geralmente nestas misturas, são utilizadas com agregados pétreos, atuando com a função de intertravamento dos agregados e proporcionando maior estabilidade (AASHTO, 1994).

O uso de WFS (*areia de fundição residual*) da indústria siderúrgica, substituição de 10% em massa em comparação com areia manufaturada, em misturas asfálticas mostrou resultados satisfatórios para rotas de tráfego leve (BAKIS *et al.*, 2006). Neste trabalho, condições de transporte de contaminantes foram simuladas por solubilização e lixiviação, mostrando o encapsulamento na mistura asfáltica, tornando o uso de areias de fundição ambientalmente inerte. Em outro estudo, 15 a 30% das quantidades de substituição foram analisadas obtendo-se resultados satisfatórios de viabilidade técnica e ambiental (JAVED *et al.*, 1994). Dyer *et al.*

(2018) também concluem a viabilidade ambiental potencial do uso de areia de fundição residual como agregado em misturas asfálticas a quente, apesar da necessidade de estudos mais aprofundados em âmbitos reativos e microestruturais deste processo serem necessários.

No Brasil, a destinação deste resíduo já é legalizada em alguns Estados. Santa Catarina estabeleceu normas através da Resolução CONSEMA 011/2008 que permite incorporação de resíduos de areias provenientes de moldagens metálicas em misturas asfálticas e em artefatos de concreto sem função estrutural (SANTA CATARINA, 2008).

Este trabalho tem como objetivo a verificação em laboratório da incorporação de areias de fundição em misturas asfálticas. Para tanto, foi avaliada a resistência mecânica por meio do ensaio de resistência à tração, perda de massa, dano por umidade induzida e módulo de resiliência e sua estabilização química de forma inerte através do ensaio de lixiviação. As areias incorporadas nas misturas asfálticas são provenientes de uma única fonte, com características morfológicas idênticas variando, entretanto, o processo de utilização e obtenção.

2. METODOLOGIA

A metodologia proposta trata da avaliação laboratorial da incorporação de areias de fundição em misturas asfálticas. Para tanto foram produzidos corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura) de acordo com a metodologia Marshall. Os corpos de prova foram avaliados de modo a se obter os parâmetros mecânicos e químicos das misturas. Os ensaios laboratoriais propostos objetivaram a comparação de resultados obtidos por uma mistura sem areia de fundição e quatro com incorporação dos resíduos, totalizando cinco misturas. A Figura 1 apresenta o fluxograma do método, cujo programa laboratorial está dividido em três etapas e detalhadas a seguir.

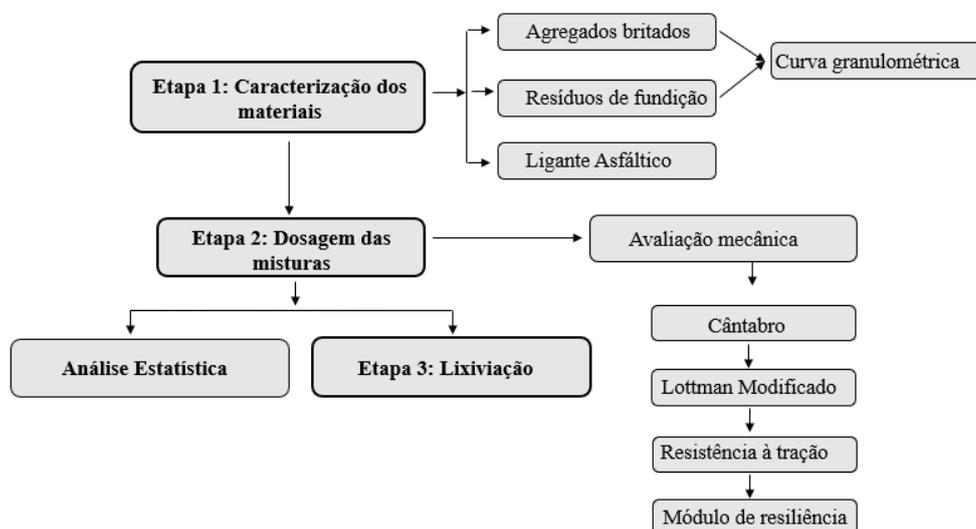


Figura 1: Fluxograma do método

A Etapa 1 apresenta a caracterização dos materiais utilizados no trabalho, agregados britados, resíduos de fundição e ligante asfáltico. Após a caracterização dos materiais foi realizada a curva granulométrica da mistura. A Etapa 2 trata da dosagem das misturas, mistura de referência e mistura com areias de fundição. Para ensaios de avaliação mecânica foi realizado ensaio de perda de massa Cantabro, dano por umidade induzida, resistência à tração e módulo de

resiliência. As misturas foram analisadas estatisticamente de forma a determinar qual das incorporações de areias de fundição melhor se adequou à mistura asfáltica com relação aos ensaios mecânicos. Por fim, a Etapa 3 apresenta o ensaio de lixiviação realizado nas misturas com incorporação de areia de fundição e seu enquadramento na norma de classificação ambiental dos resíduos.

2.1. Etapa 1: Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados para a produção das misturas asfálticas foram agregados britados (origem basáltica), ligante (convencional CAP 50/70) e resíduos de moldes de areia, as areias de fundição. Os agregados e as areias de fundição foram coletados de acordo com a norma DNER-PRO 120/1997. A Tabela 1 apresenta as normas utilizadas para caracterização dos materiais do trabalho, agregados e ligante asfáltico.

Tabela 1: Normas para caracterização dos materiais

Ensaio	Unidade	Norma
Análise granulométrica	(%)	DNER-ME 080/1994
Absorção e massa específica do agregado graúdo	(%)	DNER-ME 195/1997
Densidade do agregado graúdo	g/cm ³	DNER-ME 081/1998
Absorção do agregado miúdo	(%)	DNER-ME 084/1995
Determinação da massa específica – Cimento Portland	g/cm ³	ABNT NBR NM 23/2000

As composições granulométricas das misturas foram determinadas de acordo com limites estabelecidos para a faixa “C” de Concreto Asfáltico da norma ES 031 (DNIT, 2006). A composição e tipo de areia incorporada nas cinco misturas são apresentadas na Tabela 2. Todas as misturas foram produzidas como ligante CAP 50/70.

Tabela 2: Composição das misturas

Misturas	Brita 3/4" (%)	Brita 3/8" (%)	Pó de Pedra (%)	Cal (%)	Areia de fundição (tipo) - 5%
Referência (M1)	18	21	61	-	-
Areia Verde (AV)	15	29	50	1	Verde
Areia de Macharia (AMA)	15	29	50	1	Macharia
Areia IMF (AIMF)	15	29	50	1	IMF
Areia Pó do Exaustor (APÓ)	15	29	50	1	Pó do exaustor

Os agregados de origem basáltica e o ligante asfáltico foram ensaiados conforme a norma DNER-ME 078/1994 e apresentaram boa adesividade. Desta forma, a cal calcítica não foi incorporada na mistura de referência. De modo a garantir adesividade e boa interação entre agregados, ligante asfáltico e areias de fundição, em cada mistura deste tipo foi incorporado 1% de cal calcítica.

2.2. Etapa 2: Dosagem das misturas

A dosagem das misturas asfálticas foi realizada de acordo com a metodologia Marshall (DNER-ME 043, 1995). Todas as misturas foram dosadas individualmente. Para a determinação do teor de ligante de projeto, foram adotados cinco teores iniciais de ligante (4,0%; 4,5%; 5,0%; 5,5% e 6,0%), para cada teor foram compactados três corpos de prova. A Tabela 3 apresenta a relação dos ensaios mecânicos e as normas.

Tabela 3: Ensaios realizados nas misturas

Ensaio	Unidade	Limite	Norma
Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro	(%)	$\leq 25\%$	DNER-ME 383/1999
Determinação do dano por umidade induzida	(%)	$RRt \geq 70\%$,	ABNT NBR 15617/2015
Determinação da resistência à tração por compressão diametral	MPa	-	DNIT - ME 136/2010
Determinação do módulo de resiliência	MPa	-	DNIT-ME 135/2010

Após a realização dos ensaios mecânicos, foi feita uma análise estatística dos resultados obtidos das misturas com incorporação de areia de fundição. Foi utilizada metodologia ANOVA, com o objetivo de verificar qual areia de fundição apresentou melhor enquadramento junto aos limites estabelecidos pelas normas.

2.3. Etapa 3: Lixiviação

A classificação ambiental dos resíduos é baseada na avaliação do comportamento destes com solventes. A lixiviação, também conhecida como solubilização, é um dos procedimentos mais utilizados como forma de analisar a potencialidade de transferência da matéria para o meio natural, conforme norma ABNT NBR 10005 (2004). Foi introduzida neste trabalho de forma a garantir que as areias, quando utilizadas em misturas asfálticas, não conferem danos ambientais.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Etapa 1: Materiais

As areias de fundição apresentam a mesma constituição morfológica, entretanto são provenientes de diferentes etapas do processo de moldagem de peças fundidas, desta forma, apresentam granulometrias distintas. A Figura 2 apresenta a distribuição granulometria dos quatro tipos de areia de fundição utilizadas, juntamente com os demais materiais envolvidos no estudo.

As areias de fundição apresentam enquadramento como agregados miúdos com diâmetro inferior a 4,8 mm. A areia de macharia apresenta o maior diâmetro dos grãos, enquanto a areia pó do exaustor, o menor. Embora apresentem distinções granulométricas, as quatro areias foram encaixadas nos limites da faixa C do DNIT. A adesividade do ligante asfáltico CAP 50/70 foi verificada de acordo com a norma DNER-ME 078 (1994) nos agregados e satisfaz a normativa.

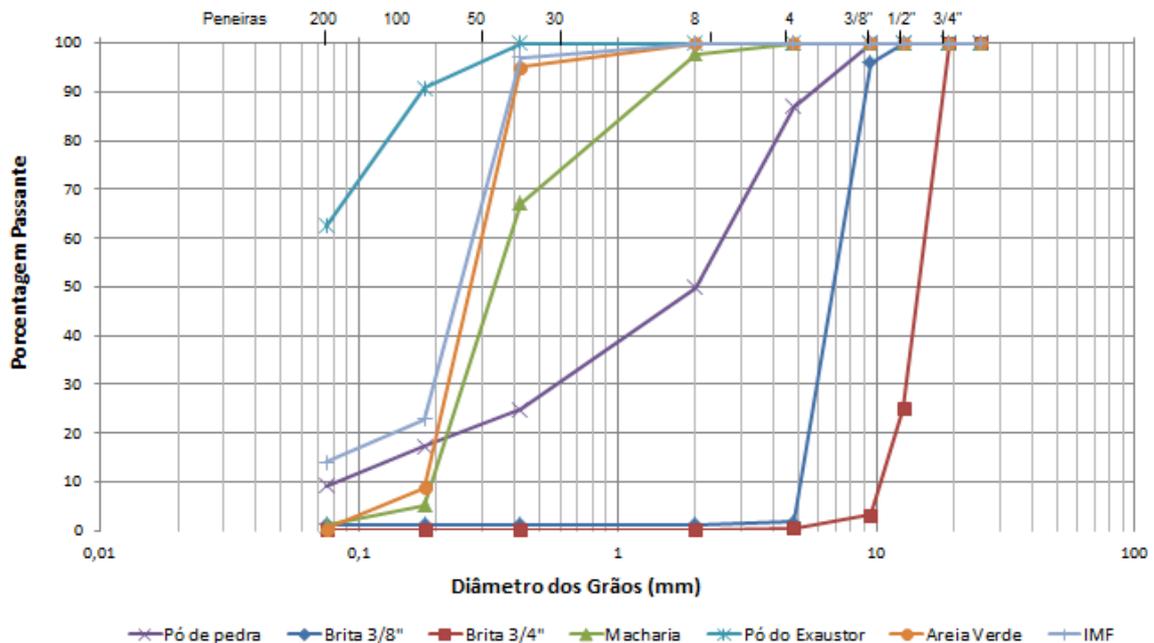


Figura 2: Granulometria dos materiais

3.2. Etapa 2: Dosagem das misturas

Após compactação dos corpos de prova, seus dados de caracterização foram determinados. Para obtenção do teor de ligante de projeto, foi fixado volume de vazios da mistura compactada de 4%. Através da interpolação dos resultados para este volume de vazios, foi definido teor de ligante de projeto de 4,5%. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para cada uma das cinco misturas com o teor de ligante de projeto. Os valores apresentados em cada um dos ensaios correspondem à média aritmética de três corpos de prova, para cada uma das cinco misturas.

Tabela 4: Valores das misturas para teor de ligante de projeto

Misturas	Vol. vazios (%)	RBV (%)	VAM (%)	DMT (g/cm ³)	Dap (g/cm ³)	Estabilidade (1/100 in)	Fluência (kgf)
Referência (M1)	4,2	79	14,82	2,68	2,60	2030	10
Areia Verde (AV)	4,6	71	16,01	2,67	2,55	2166	13
Areia de Macharia (AMA)	4,6	72	16,08	2,69	2,57	2079	12
Areia IMF (AIMF)	4,4	72	15,85	2,66	2,54	2042	11
Areia Pó do Exaustor (APÓ)	4,1	76	15,25	2,69	2,59	2024	13

*RBV: relação betume vazios; *VAM: vazios do agregado mineral; *DMT: densidade máxima teórica; *Dap: densidade aparente.

3.2.1. Análise mecânica

Após determinação do teor de ligante de projeto, foram compactados os corpos de prova para os ensaios de análise mecânica. Para cada um dos ensaios listados na Figura 3 **Tabela 1** foram compactados três corpos de prova.

A perda de massa das misturas foi verificada através do ensaio Cantabro. Os resultados são apresentados pela Figura 3. A perda de massa das cinco misturas foi inferior ao limite máximo permitido (25%) pela norma DNER-ME 383/99. A mistura de referência (M1) apresentou menor perda de massa (5,03), enquanto a mistura com incorporação de areia verde (AV) apresentou a maior (6,86%).

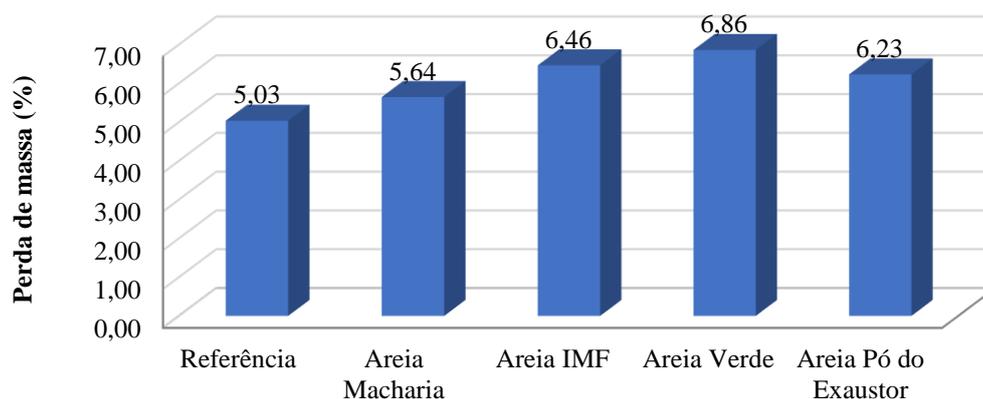


Figura 3: Perda de massa das misturas – Cantabro

Para verificação do dano causado pela água nas misturas, foi realizado o ensaio de dano por umidade induzida, Lottman Modificado. Seis corpos de prova foram compactados com o teor de ligante de projeto (4,5%). A relação entre a resistência à tração dos três corpos de prova que passaram por condicionamento (RT1) e os três sem condicionamento (RT2), rompidos a temperatura de 25° C, devem apresentar valores superiores a 70% conforme a ABNT NBR 15617/2015. Os resultados obtidos pelas misturas analisadas são apresentados pela Tabela 5. A mistura que apresentou maior resistência retida à tração foi a com incorporação de areia de macharia com 97,92%, tendo melhora de quase 6% em relação a mistura de referência. A mistura com incorporação de areia de pó do exaustor (APÓ) apresentou a menor porcentagem, 85,21%, com diminuição em torno de 6%.

Através dos resultados apresentados, é possível verificar que todas as misturas atendem os limites estabelecidos.

Tabela 5: Resultados da metodologia Lottman

Misturas	RT1	RT2	RRt (%)
Referência (M1)	0,894	0,822	91,96
Areia Macharia (AMA)	0,931	0,912	97,92
Areia IMF (AIMF)	0,957	0,827	86,40
Areia Verde (AV)	0,939	0,887	94,43
Areia. Pó do Exaustor (APO)	0,917	0,782	85,21

A resistência à tração das misturas é apresentada pela Tabela 6. Os resultados mostraram que a mistura com areia de macharia (AMA) foi à única que não apresentou aumento de resistência com relação à mistura de referência. Este fato pode ter relação com a resina hidrofugante que recobre suas partículas, pode ter dificultado a interação entre os grãos e os agregados da mistura.

Todas as misturas avaliadas se encaixam nos limites estipulados por Bernucci *et al.* (2006), que afirmam que os valores típicos para misturas asfálticas se situam entre 0,5 e 2,0MPa.

Tabela 6: Resistência à tração das misturas

Misturas	Média RT (MPa)	σ (MPa)
Referência (M1)	1,04	0,010
Areia Macharia (AMA)	0,70	0,053
Areia IMF (AIMF)	1,15	0,092
Areia Verde (AV)	1,10	0,013
Areia Pó do Exaustor (APO)	1,09	0,030

Os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência são apresentados pela Figura 4. Observa-se que a mistura com incorporação de areia verde apresentou o maior resultado (7.460 MPa) seguida da mistura com areia IMF (7.102 MPa). Respectivamente valores 17,23% e 13,06% superiores à mistura de referência (6.175 MPa). Bernucci *et al.* (2006) cita que valores típicos de MR, a 25°C e 10Hz, para concretos asfálticos, estão na faixa de 2.000 a 8.000MPa. Todas as misturas avaliadas na presente pesquisa se apresentam dentro desse limite.

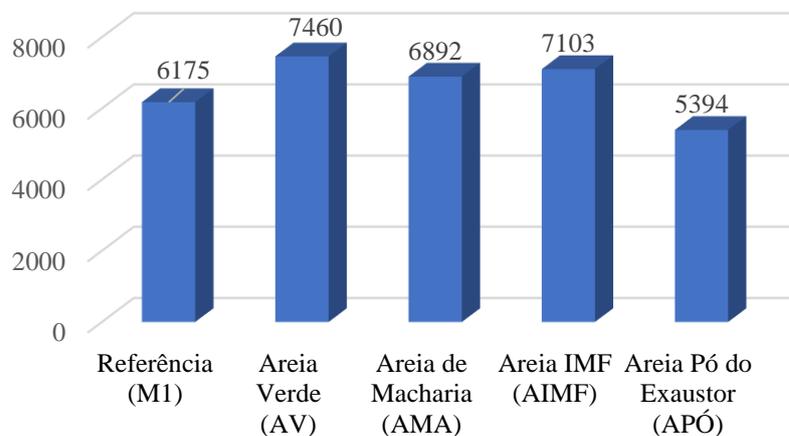


Figura 4: Resultados médios de módulo de resiliência (MPa)

Após a análise dos resultados, percebeu-se que as misturas com incorporação de areia de fundição apresentaram comportamentos distintos. A fim de determinar a mistura que manteve seus parâmetros mais constantes em todos os ensaios, respeitando os limites normativos, fez-se a análise estatística através da análise de variância (ANOVA). A análise foi realizada considerando os ensaios onde todas as amostras foram condicionadas aos mesmos parâmetros.

O teste de Tukey faz parte da análise estatística da ANOVA. Através do valor obtido para a DMS (diferença mínima significativa) determina-se o valor da mistura de referência, neste caso DMS de 3.375,29. Após os cálculos, a mistura com valor mais próximo ao DMS referência é a com melhor enquadramento nos parâmetros normativos. As areias incorporadas nas misturas apresentam propriedades microscópicas distintas e desta forma podem apresentar variação nos ensaios mecânicos realizados. De forma a determinar o tipo de areia que apresentou melhor incorporação na mistura asfáltica, o enquadramento nos valores limites das normativas, foi considerado, além da DMS. A Tabela 7 apresenta os resultados de cada mistura de acordo com os ensaios mecânicos realizados.

Tabela 7: Resumo das misturas nos ensaios realizados

Misturas	RT (Mpa)	Mr (Mpa)	Cantabro (%)	RRt (%)	DMS
MI	1,04	6175,17	5,03	91,96	3375,29
AMA	0.7	6892,33	5,64	97,92	3298,96
AV	1,1	7460,33	6,86	94,43	3428,44
AIMF	1,15	7102,83	6,46	86,39	3309,25
APÓ	1,09	5393,67	6,23	85,21	3360,48

Após a análise de variâncias, em função da DMS obtida com relação ao valor de referência, concluiu-se que a mistura com melhor enquadramento nos limites normativos foi aquela com incorporação de areia de fundição pó do exaustor (APÓ) com DMS de 3.360,48. Esta mistura satisfaz todos os valores limites estabelecidos pelas normativas, entretanto nos ensaios de módulo resiliente (Mr), perda de massa no ensaio de Cantabro e dano por umidade induzida (RRt) seus valores apresentaram desempenho inferior ao de outras misturas.

O segundo melhor resultado observado, segundo ANOVA, foi a mistura com areia de macharia (AMA) com DMS de 3.238,96. Esta, satisfaz as normativas em todos os ensaios, além da menor perda de massa no ensaio Cantabro e a maior resistência retida a tração (RRt) no ensaio de dano por umidade induzida. Estes valores demonstram que, além de apresentar boa resistência, a mistura AMA tem menor desgaste em campo e maior resistência à água. Desta forma, mesmo com o segundo melhor desempenho na análise ANOVA, nesta pesquisa, a mistura AMA foi selecionada como o melhor tipo de areia incorporada nas misturas asfálticas, entre as testadas.

Ao final da pesquisa, as misturas com areias de fundição foram classificadas de forma geral e de acordo com seu desempenho mecânico em cada um dos ensaios realizados. A mistura AMA apresentou melhor desempenho em quatro ensaios e desta forma é recomendada como a melhor incorporação de areia de fundição nas misturas asfálticas. O ranqueamento das misturas com areia de fundição, em função dos limites normativos, é apresentado na Tabela 8. A incorporação de areia em todas as misturas foi de 5%, variando seu tipo.

Tabela 8: Classificação geral das misturas de acordo com os ensaios realizados

Misturas	RT (Mpa)	Mr (Mpa)	Cântabro (%)	RRt (%)	DMS
AMA	0,7	6892,33	5,64	97,92	3298,96
APÓ	1,09	5393,67	6,23	85,21	3360,48
AIMF	1,15	7102,83	6,46	86,39	3309,25
AV	1,1	7460,33	6,86	94,43	3428,44

3.3. ANÁLISE DA LIXIVIAÇÃO

A classificação dos resíduos quando à periculosidade é avaliada em função do contato deste com um solvente normatizado pela ABNT NBR 10005 (2004). A potencialidade de contaminação do meio natural é relativa à concentração de cada composto na mistura final. De acordo com estas concentrações o resíduo pode ou não ser depositado diretamente na natureza.

A Figura 5 apresenta a quantidade de cada elemento químico encontrado nas areias de fundição utilizadas. Esta análise foi realizada posterior à compactação das misturas asfálticas, desta forma, o ligante asfáltico que envolveu os agregados pode ter influenciado os valores.

Segundo a avaliação técnica dos materiais durante ensaio de lixiviação, nenhum dos elementos analisados ultrapassou os limites máximos indicados pela norma. As misturas com incorporação de areia de fundição classificam-se desta forma então como Resíduo Não Perigoso Classe II e não apresentam perigo ambiental. Assim, o uso de areias de fundição em misturas asfálticas é indicado segundo esta pesquisa. Sua incorporação melhora propriedades mecânicas das misturas convencionais, como dano por umidade induzida, resistência à tração e módulo de resiliência.

	Elementos analisados							
	Cd	Cr total	Pb	As	Se	Ag	Ba	Hg
	Limite Máximo NBR 10.004 (mg/L)							
	0,5	5,0	1,0	1,0	1,0	5,0	70,0	0,1
Amostras	Valores medidos (mg/L)							
Macharia 50%	< 0,002	0,06	< 0,01	< 0,02	0,04	0,02	0,51	0,000489
Areia verde 20% BC	< 0,002	0,02	< 0,01	< 0,02	0,03	0,03	0,24	ND
Areia verde	< 0,002	< 0,004	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,01	0,04	0,000243
Areia verde 50% QC	< 0,002	0,05	< 0,01	< 0,02	0,04	0,02	0,44	ND
Areia de Macharia	< 0,002	< 0,004	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,01	0,06	ND
Areia Pó de Exaustor	< 0,002	< 0,004	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,01	0,09	0,000319
Areia de IMF	< 0,002	< 0,004	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,01	0,01	ND
Areia verde 10%	< 0,002	0,07	< 0,01	< 0,02	0,04	0,03	0,25	ND

ND = Não detectado

Figura 5: Resultados análise de lixiviação

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve com o objetivo avaliar, através de ensaios laboratoriais, a reutilização de areias de fundição em misturas asfálticas. Com relação aos resultados, pode-se concluir que a incorporação destas areias não apresentou diminuição expressiva da perda de massa, avaliada através do ensaio Cantabro, em relação à mistura de referência.

Sobre o ensaio de dano por umidade induzida, a mistura com incorporação de areia de macharia (AMA) apresentou melhor desempenho, enquanto a mistura com areia pó do exaustor (APO), o menor. Todavia, todas as misturas apresentaram valores satisfatórios de RRt e condizentes com a literatura.

O ensaio de resistência à tração mostrou que a maioria das misturas com incorporação de areia de fundição (areia verde, IMF e pó do exaustor) apresentou aumento de resistência, em comparação à mistura de referência, exceção da mistura com incorporação de areia de macharia (AMA), que apresentou resistência inferior.

Como análise ao ensaio de módulo de resiliência, conclui-se que a mistura que apresenta maior rigidez é aquela com inserção de areia verde (AV). Todas as misturas estão de acordo com dados da literatura, apresentando módulo de resiliência apropriados para aplicação.

Com relação à análise estatística, a mistura com menor diferença mínima significativa e, portanto, indicada como melhor incorporação, foi a com areia pó do exaustor (APO). Esta

mistura apresenta menor módulo de finura entre as areias e assim pode ter apresentado comportamento de fíler e favorecido a mistura convencional. Por este motivo e por ter apresentado desempenho inferior ao de outras misturas em três ensaios, a análise estatística não foi utilizada de forma exclusiva na determinação da melhor incorporação de areia.

Ao final, as misturas foram classificadas de forma geral e de acordo com seu desempenho mecânico em cada um dos ensaios realizados. A ordem das misturas com areia de fundição, em função dos limites estabelecidos pelas normativas, se dá desta forma: AMA, APÓ, AIMF e AV.

De acordo com a avaliação técnica dos materiais durante ensaio de lixiviação, nenhum dos elementos analisados ultrapassou os limites máximos indicados pela norma. Sendo assim, não apresentam perigo ambiental e podem ser utilizadas em misturas asfálticas, não conferindo riscos à natureza.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao apoio financeiro da CAPES. Aos laboratórios de Engenharia Civil da UNIJUI – Ijuí/RS, UFSM – Santa Maria/RS e da UFRGS – Porto Alegre/RS, pela realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2000) *NBRNM 23 - Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) *NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) *NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2015) *NBR 15617- Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AASHTO (1994) - *Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis*. American Association of Highway and Transportation. Washington, United States of America, 1994.
- AMERICAN FOUNDRY SOCIETY (AFS), *Modern Casting*. Disponível em: <https://www.afsinc.org/>. Acessado em: 08 de julho de 2018.
- ABETRE (2018) - *Resíduos Sólidos. Manual de boas práticas no planejamento*. Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.abetre.org.br/estudos-e-publicacoes/publicacoes/publicacoes-abetre/ManualdeBoasPrcticasAbrelpe2013.pdf/> Acessado em: 28 de junho de 2018.
- ABIFA (2018) - *Guia ABIFA de Fundição, Anuário*. Associação Brasileira de Fundição. Disponível em: http://abifa.org.br/wp-content/uploads/2016/09/revista_abifa_193.pdf />. Acessado em: 29 de junho de 2018.
- BAKIS, R.; KOYUBCU, H.; DEMIRBAS, A. *An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures*, Waste Management & Research, 2006, vol. 24, p. 269-274.
- BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. 504 f. 1ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006.
- BINA, P. *Methodology for the Use of Industrial Waste in Paving: Case Study of Sand Casting*. Institute of Technological Research, Sao Paulo--SP, 2002.
- BONET, I. I.; PANAROTTO, C. T.; POSSAMAI, O. *Valorisation des residus de sable de fonderie (RSF): incorporation dans les enrobés asphaltiques de type BBMC (betonbitumineuxmalaxe a chaud) [Technical availability of the reusing of the Melting Sand Residue: MSR on the hot bitumenconcrete]*. In: Proceeding of International Congress of Environment & Transport, Avignon, France, 2003, pp. 215-219. ISBN: 2-85782-589-7.
- BONIN, A. L.; ROSSINI, A. J.; ZAMBIM, A. F. P. *Reuse of Black Casting Sand in Civil Construction*. ABIFA, 1995.
- DNER (1995) *ME 043 – Misturas betuminosas a quente, Ensaio Marshall*. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1994) *ME 078 – Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso*. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

- DNER (1994) *ME 080 – Solos - Análise granulométrica por peneiramento*. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1998) *ME 081 – Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1995) *ME 084 – Agregado miúdo - Determinação da densidade real*. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1997) *PRO 120 – Coleta de amostras de agregados*. Procedimento. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1999) *ME 383 – Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero- Ensaio Cantabro*. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (2010) *ME 135 – Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência*. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (2010) *ME 136 – Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNIT (2006) *ES 031 – Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico*. Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. Rio de Janeiro.
- DYER, P. P. O. L.; LIMA, M. G. de; KLINSKY, L. M. G.; SILVA, S. A.; COPPIO, G. J. L. *Environmental characterization of Foundry Waste Sand (WFS) in hot mix asphalt (HMA) mixtures*. Construction and Building Materials, 2018, p. 474+. DOI: <http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.163>.
- FURB, M. K. (2016) *Resíduos da indústria de fundição no município de Blumenau, Santa Catarina*. Anais Encontro de Sustentabilidade em Projeto. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- JAVED, S.; LOVELL, C. W.; WOOD, L. E. *Waste Foundry Sand in Asphalt Concrete*. Transportation Research Record 1437, Transportation Research Board, Washington, DC, 1994.
- HICKS, R. G. *Moisture damage in asphalt concrete*. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, Transportation Research Board, Washington, 1991. 91p.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Relatório Técnico 61, Perfil da fundição. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia*. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P35_RT61_Perfil_da_Fundicao.pdf/182e4c30-328b-4e8c-8df8-e7ed75ffc16d />. Acessado em: 28 de junho de 2018.
- SANTA CATARINA (2008) - *Resolução CONSE MA 011/08: Critérios para a utilização de ADF de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto não estrutural*. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. Conselho Estadual do Meio Ambiente – CONSEMA. Estado de Santa Catarina, 14p.

Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia (emmanuelle.holdefer@gmail.com)¹

Liseane Padilha Thives (liseanethives@gmail.com)¹

Kátia Aline Bohn (katia0706bohn@yahoo.com.br)¹

José Antônio Santana Echeverria (jose.echeverria@unijui.edu.br)²

¹ Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina Rua João Pio Duarte Silva, s/n, Córrego Grande - Florianópolis/SC, Brasil.

² Departamento de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul Rua do Comércio, 3000, Bairro Universitário – Ijuí/RS, Brasil.