

Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado

Raquel Luísa Pereira Carnin

raquel@tupy.com.br

Cláudio Oliveira Silva

claudio.silva@abcp.org.br

Ricardo José Pozzi

Dirceu Cardoso Junior

Marilena Valadares Folgueras

Wendel Malkowski

RESUMO

A possibilidade do aproveitamento da areia descartada de fundição como agregado na produção de artefatos de cimento, pode contribuir tanto para reduzir o volume de material descartado, quanto para atender à grande demanda regional de construção de ruas e calçadas contribuindo para o desenvolvimento sustentável. O objetivo deste estudo foi o de utilizar areia descartada de fundição na produção de peças de concreto utilizados em pavimentos intertravado. Com os resultados obtidos foi possível implantar uma fábrica piloto para produção das peças.

PALAVRAS-CHAVE

Areia Descartada de Fundição, Pavimento Intertravado, Paver, Fábrica Piloto, Reciclagem.

ABSTRACT

The possibility in using discarded foundry sand as aggregate to the production of precast concrete, can contribute to reduce the discarded material volume as well to attend the great regional demand of street and sidewalk pavement construction, contributing with the sustainable development. The objective of this study was using discarded foundry sand in the production of concrete paving blocks (paver). With the results obtained it was possible to plant a pilot facility to the production of paver.

KEYWORDS

Discarded foundry sand, Interlocking pavement, Paver, Pilot facility. Recicly.

1. INTRODUÇÃO

As areias de fundição representam um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. Somente no Brasil são gerados cerca de três mi-

lhões de toneladas por ano (ABIFA, 2009). A extração da areia usada para a construção civil aliado ao acúmulo de areia descartada de fundição em aterros causa significativos impactos ambientais. Por isso, o reaproveitamento da areia descartada de fundição deveria

ser incentivado para a redução do quantitativo de areia extraído da natureza.

Alguns estudos preliminares sobre o uso de areia descartada de fundição como agregado para aplicações na construção civil já foram feitos no Brasil (CARNIN, 2008; COUTINHO, 2004; STEFENON, 2003; BONET, 2002, BONIN, 1995 e BINA *et al*, 2000) com resultados satisfatórios.

O relatório desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA de 2006 demonstra que os maiores volumes de areia descartada de fundição estão sendo utilizados em geotécnica, em aplicações como em bases de estradas e cobertura de aterros. Destaca que, dependendo da qualidade da areia descartada de fundição, esta poderá ser um excelente agregado para a produção de cimento Portland, concreto asfáltico e produtos de concretos. Em casos mais restritos, a areia descartada de fundição está sendo usada em solos agrícolas e outras aplicações como a compostagem.

O reaproveitamento de resíduos de fundição na Europa é recente, no entanto em franco desenvolvimento, por ser considerado uma prioridade dentro da indústria européia por seus benefícios de preservação ambiental e econômico.

No Brasil, tanto no Estado de Santa Catarina como no Estado de São Paulo, a areia descartada de fundição pode ser utilizada em misturas asfálticas e artefatos de concreto sem função estrutural de acordo com as normas legais de cada um dos estados (Santa Catarina Resolução CONSEMA 011/2008 e São Paulo Decisão de Diretoria nº 152/2007/C/E).

Este estudo mostra a utilização da areia descartada de fundição como agregado para a fabricação de pisos intertravados, conhecidos comercialmente de paver e apresenta os aspectos mecânicos e ambientais desta utilização, explorados em profundidade nesta investigação. Realizou-se também o planejamento e a execução de uma fábrica piloto para utilizar a areia descartada de fundição na produção deste artefato.

Tendo em vista a diversidade de denominações, doravante a Areia Descartada de Fundição será identificada pela sigla ADF, que compreende as seguintes

identificações: resíduo areia de moldagem, matéria-prima alternativa e resíduo areia de fundição.

1.1 REVISÃO DE LITERATURA

1.1.1. A Areia de Fundição

A areia de fundição é uma mistura de vários elementos que se combinam dando características de perfeita trabalhabilidade da mistura que compõe a caixa de moldagem.

Maleabilidade, compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos como compressão e tração, expansividade volumétrica, permeabilidade e perfeita desmoldagem são algumas características que a areia adquire devido sua mistura (BONIN, 1995).

A areia de fundição é constituída basicamente por: areia, pó de carvão, bentonita e água.

O principal componente da areia utilizada nas fundições é um agregado fino, mineralogicamente puro, denominado “areia base”. A areia base é constituída essencialmente de sílica (óxido de silício – SiO_2).

A bentonita é um silicato de alumina hidratado (contém em sua composição silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio). É formada por lamelas, sendo classificada pela espessura das mesmas.

De um modo geral, o pó de carvão é formado por matéria volátil, carbono fixo, cinzas, água e enxofre.

A característica principal da água na mistura da areia de moldagem é tornar possível a propriedade coesiva dos elementos da mistura através do aumento da umidade.

Em síntese, os moldes conformam as faces externas ao passo que os machos conformam as faces internas da peça metálica.

1.1.2. O Processo de Fundição

A fundição é o método mais rápido para se obter peças metálicas acabadas. Consiste, principalmente em verter (vazamento) metal líquido em caixas de moldagem, com machos montados em seu interior, que caracterizará a peça após a solidificação do metal.

A fundição emprega nos seus processos modelos, moldes e machos que promovem às peças fundidas a

sua conformação, de acordo com as etapas existentes de moldagem, fusão e acabamento.

A formulação da areia de fundição a ser usada depende do tipo de metal ou liga a ser fundida. Moldabilidade, compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos como compressão e tração, expansividade volumétrica, permeabilidade e perfeita desmoldagem são algumas características da areia de fundição adquiridas no processo de aglomeração executado pelos misturadores.

As etapas do processo de fundição são:

1. Preparo da areia de fundição, também conhecida como areia de moldagem e preparo da areia de macharia;
2. Fusão do metal nos fornos de indução e cubilô (também chamados de Cupola);
3. Vazamento do ferro líquido em aproximadamente 1400 °C;
4. Desmoldagem e geração da ADF;
5. Resfriamento e limpeza das peças;
6. Acabamento das peças;
7. Envio das peças aos clientes.

1.1.3. Preparo da Areia de Fundição

O processo de moldagem é do tipo regenerativo. O material que chega ao final do ciclo de trabalho retorna através de correias transportadoras ao início do processo, reutilizando a mesma areia. Pelos motivos de perda de volume e da descaracterização dos componentes da mistura, torna-se necessário o descarte de parte da areia de fundição, gerando a ADF – Areia Descartada de Fundição, e a freqüente reposição de matérias-primas e o controle de qualidade.

A areia de fundição é preparada por meio da descarga de areia nova e areia usada, com a quantidade de água calculada por um controlador de compatibilidade, de modo que a areia caia na máquina de moldar com a umidade final pretendida. A quantidade de água certa para o teor de bentonita pode ser verificada no momento em que é efetuada a mistura, podendo esta ser corrigida (SCHULZ, 2005). Os demais aditivos são injetados no recipiente de mistura, que funciona continuamente.

O misturador é o elemento principal para a preparação de areia de fundição, onde são misturadas a

areia lavada e areia retorno, bentonitas ativada e natural, pó de carvão e água. Na Figura 1 pode-se verificar o aspecto físico das bentonitas e do pó de carvão.



Figura 1. Matérias-primas da Areia de Fundição (PEREIRA, 2005).

1.1.4. Pavimento Intertravado

O pavimento intertravado com peças de concreto, conhecidas comercialmente como *paver*, por sua versatilidade e facilidade de aplicação, tem sido bastante utilizado na construção de pavimentos urbanos. O pavimento se caracteriza pela facilidade de execução e rápido treinamento da mão-de-obra. Em geral, não necessita de equipamentos especiais e de grande porte, permitindo a utilização de mão-de-obra local e frentes de trabalho simultâneas, resultando em economia de tempo de construção e liberação ao tráfego imediata (SIMIELI, *et al*, 2007).

A ABCP (2002) destaca outras vantagens para o uso do piso intertravado:

- Não há propagação de eventuais trincas das camadas de base para superfícies;
- Há facilidade de reparação e de reutilização das peças de concreto, possibilitando acesso às instalações de serviços subterrâneos;
- Apresenta capacidade estrutural, durabilidade, resistência à abrasão, ao ataque de óleos e ao derramamento de combustíveis, conferindo maior valor paisagístico e visibilidade superior, tanto à luz do dia quanto sob luz artificial;

O pavimento intertravado é um tipo de pavimento flexível e sua construção se assemelha à um pavimento asfáltico, com preparação do subleito, sub-base ou base e camada de revestimento. A construção da camada de revestimento é bastante simples, as pedras de concreto são assentadas sobre uma camada de assentamento composta por areia média ou grossa, em seguida espalha-se areia fina para o preenchimento das juntas

e executa-se a compactação, até que as juntas fiquem totalmente preenchidas.

Consegue-se, assim, o intertravamento das peças, que proporciona resistência a esses pavimentos e os diferencia dos demais. Recomenda-se que as peças tenham espessuras mínimas de 6 cm para pavimentos com tráfego leve; de 8 cm para pisos submetidos ao tráfego de veículos comerciais; e de 10 cm para casos especiais.

2. DESCRIÇÃO GERAL E MÉTODOS INVESTIGATIVOS

Para verificar se a ADF atendia as exigências estabelecidas na Resolução CONSEMA 011/08 foram realizadas as seguintes caracterizações:

- Caracterização e de classificação da ADF, segundo a norma da ABNT NBR 10004;
- Análises químicas do extrato lixiviado – utilizando a metodologia apresentada na norma da ABNT NBR 10005;
- Análises químicas do extrato aquoso;
- Análises de testes de toxicidade, conforme metodologia estabelecida pela Portaria FATMA Nº 17, de 18 de abril de 2002.

2.1. Caracterização da ADF conforme Resolução CONSEMA 011/08

A caracterização e classificação da ADF foram realizadas no Laboratório Acquaplant Química do Brasil Ltda, localizado em Joinville – SC. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Para realização das análises foram utilizados os métodos padrões que compõem o Standard Methods vigésima edição.

A classificação foi realizada pela comparação dos resultados obtidos nas análises com os padrões que se encontram na Norma ABNT NBR 10.004 – Resíduos Sólidos: Anexo F – Concentração – Valor Máximo no extrato obtido pelo teste de lixiviação; Anexo G – Padrões para o teste de solubilização.

Segundo a comparação realizada entre o lixiviado e o solubilizado, apresentada na Tabela 1 a ADF é classificada como Resíduo Classe IIA – NÃO INERTE, em

função dos elementos alumínio e ferro com valores superiores ao padrão na análise feita no solubilizado. Segundo o estudo realizado por CARNIN, 2008 os solos de Joinville possuem alumínio, ferro e manganês, no extrato solubilizado, acima do limite máximo permitido pela NBR 10.004. Se fossem resíduos industriais seriam classificados como Resíduo Classe II A – Não Inerte. Cabe salientar que a ADF não é um resíduo perigoso.

Seguindo os procedimentos estabelecidos na Resolução CONSEMA 011/08 para utilizar a ADF em artefatos de concreto sem função estrutural esta deve apresentar concentrações de poluentes no extrato lixiviado, obtido conforme a norma ABNT NBR 10.005, menores ou iguais às concentrações permitidas (Tabela 2). Também deve apresentar concentrações de poluentes no extrato aquoso menores ou iguais às concentrações máximas permitidas e ainda, deve apresentar pH na faixa entre 5,5 e 10,0. Os resultados destas podem ser visualizados na Tabela 3.

Foi realizado o estudo de toxicidade aguda do extrato solubilizado da ADF conforme Portaria FATMA nº 17/02.

Os testes de toxicidade aguda foram realizados no Laboratório de Toxicologia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

A metodologia para realização dos testes de toxicidade aguda com os microorganismos *Daphnia magna* seguiu a NBR 12.713 de 2003. Os resultados dos testes de toxicidade podem ser visualizados na Tabela 1.

De acordo com os resultados foi possível verificar que a ADF atende todos os requisitos da Resolução 011/08, podendo assim ser utilizada na fabricação de artefatos de concreto sem função estrutural.

2.2. DESENVOLVIMENTO DA FÁBRICA PILOTO

Após o estudo de caracterização da ADF, iniciou-se a elaboração de uma fábrica piloto para a produção de artefatos de concreto.

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre a produção de artefatos de concreto sem função estrutural e optou-se pela fabricação de peças de concreto para pavimento intertravado, conhecido comercialmente como paver, que é definido como uma peça pré-moldada,

Tabela 1. Parâmetros químicos no lixiviado, solubilizado da ADF pela NBR 10.004

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)		Solubilizado (mg/L)	
	NBR 10005		NBR 10006	
	Resultados	VMP ⁽¹⁾	Resultados	VMP ⁽¹⁾
Alumínio			44,26	0,2
Arsênio	< 1,000 x 10 ⁻⁴	1,0	3,990 x 10 ⁻³	0,01
Bário	< 0,20	70	< 0,20	0,7
Cádmio	< 0,001	0,5	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	1,0	< 0,01	0,01
Cianetos			< 0,005	0,07
Cloretos			49,67	250
Cobre			< 0,005	2,0
Cromo Total	< 0,030	5	< 0,030	0,05
Fenóis totais			0,125	0,01
Ferro			25,988	0,3
Fluoretos	< 1,000	150	< 1,000	1,5
Manganês			< 0,005	0,1
Mercurio	< 1,000 x 10 ⁻⁴	0,1	< 1,000 x 10 ⁻⁴	0,001
Nitrato (expresso em N)			8,00	10,0
Prata	< 0,02	5,0	< 0,02	0,05
Selênio	< 1,000 x 10 ⁻⁴	1,0	< 1,00 x 10 ⁻⁴	0,01
Sódio			127,530	200
Sulfato (expresso em SO ₄)			50,48	250
Zinco			0,019	5,0

⁽¹⁾ VMP – Valores Máximos Permitidos – ABNT NBR 10.004 / 2004.

Tabela 2. Parâmetros químicos do extrato lixiviado da ADF pela Resolução CONSEMA 011/08

Parâmetros	Resultados	VMP ⁽¹⁾
Arsênio (mg/L)	< 1,000 x 10 ⁻⁴	0,50
Bário (mg/L)	0,03	10,0
Cádmio (mg/L)	< 0,001	0,10
Chumbo (mg/L)	< 0,01	0,50
Cromo Total (mg/L)	< 0,030	0,50
Massa lixiviada (g)	50,025	–
Mercurio (mg/L)	1,700 x 10 ⁻³	0,02
Selênio (mg/L)	1,90 x 10 ⁻³	0,10

⁽¹⁾ VMP – Valores Máximos Permitidos – Resolução CONSEMA 011 de 2008

Tabela 3. Parâmetros físico-químicos do extrato aquoso da ADF pela Resolução CONSEMA 011/08

Parâmetros	Resultados	VMP ⁽¹⁾
Cianetos (mg/L)	< 0,005	2,0
Cloretos (mg/L)	12,53	2.500,0
Cobre (mg/L)	0,015	2,5
Fenóis Totais (mg/L C ₆ H ₅ OH)	< 0,050	3,0
Ferro Total (mg/L)	6,239	15,0
Fluoretos (mg/L)	< 1,000	14,0
Manganês (mg/L)	< 0,005	0,50
Massa lixiviada (g)	50,060	–
Níquel (mg/L)	< 0,020	2,0
pH final extrato aquoso (-)	6,88	5,5 – 10,0
pH inicial extrato aquoso (-)	7,95	–
Sódio (mg/L)	97,58	2500,0
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	612,0	5.000,0
Sulfato (mg/L)	123,68	2.500,0
Sulfeto (mg/L)	< 0,050	5,0

⁽¹⁾ VMP – Valores Máximos Permitidos – Resolução CONSEMA 011 de 2008

Tabela 4. Resultados dos testes de toxicidade aguda com *Daphnia magna*.

Amostra	pH	Fator de Diluição – FD	Limite Máximo Toxicidade – FD	Resultados
ADF – 1ª réplica	7,62	1	4	Não tóxica
ADF – 2ª réplica	7,48	1	4	Não tóxica
ADF – 3ª réplica	7,44	1	4	Não tóxica
ADF – 4ª réplica	7,66	1	4	Não tóxica
ADF – 5ª réplica	6,90	1	4	Não tóxica

de formato geométrico regular, com comprimento máximo de 40 cm, largura mínima 10 cm e altura mínima 6 cm.

A fábrica piloto foi projetada considerando-se as exigências técnicas para a produção das peças de acordo com as informações encontradas na pesquisa bibliográfica.

Foram adaptados e desenvolvidos os seguintes equipamentos:

1. Silos para armazenamento de cimento e ADF;
2. Um misturador para as matérias-primas: cimento, ADF, pó de brita e água;
3. Uma prensa hidráulica;
4. Um suporte para a realização da cura e estoque.

Ainda houve a necessidade da aquisição de um carrinho de mão para o transporte dos materiais preparados até a prensa hidráulica. A Figura 2 mostra o esquema ilustrativo da elaboração da fábrica piloto de paver.

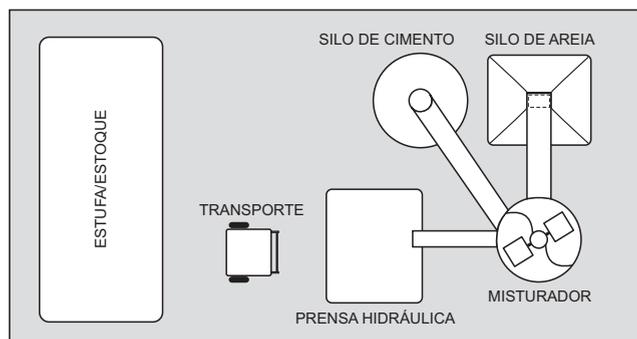


Figura 2. Esquema ilustrativo da fábrica piloto de peças de concreto.

Com a montagem da fábrica piloto foi iniciado o estudo para dosagem dos materiais constituintes para este tipo de artefato.

Os materiais empregados no desenvolvimento dos traços de piso intertravado de concreto foram os seguintes:

- Aglomerante: cimento CP V ARI,
- Água: proveniente do sistema de abastecimento público de Joinville – SC;

- Agregados: utilizou-se o pó de brita da Mineradora Rudnick de Joinville;
- Areia Descartada de Fundição: proveniente da Tupy S.A. de Joinville.

Foi realizada a caracterização granulométrica da ADF de acordo com a norma da ABNT NBR7211 e estes resultados estão apresentados na Tabela 5.

Na produção do concreto para uso em peças de concreto, foi necessário realizar o estudo de dosagem, para definir um traço padrão com resistência mínima de 35 MPa, conforme previsto na NBR 9781.

O processo de cura das peças foi elaborado para uma situação que simula uma estufa, com a utilização de plástico a cada camada de peças produzidas, colocados sobre um palete. Cada palete possui seis camadas, portanto, seis camadas de plástico. Nesta situação as peças ficam por cerca de sete dias para realização da cura final. Após a cura, o palete é baldeado para retirada dos plásticos e as peças estão prontas para utilização. A Figura 3 ilustra o esquema do processo de cura do paver.

A cura do concreto é conhecida como o conjunto de medidas que tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, que é responsável pela pega e endurecimento do concreto. O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível dessa condição até que os espaços inicialmente ocupados pela água sejam ocupados pelos produtos da hidratação do aglomerante. A cura adequada é fundamental para que o concreto alcance o melhor desempenho, proporcionando uma redução de sua porosidade, contribuindo para aumentar a durabilidade das estruturas (Figura 3).

Com a efetivação do processo de cura das peças de concreto, as amostras foram analisadas para veri-

Tabela 5. Resultados do Ensaio Granulométrico da ADF.

Ensaio Granulométrico					
Peneiras (mesh)	Peneiras (mm)	Massa (g)	Retenção (%)	Coefficiente	Produto
6	3,36	0,00	0,00	3	0
12	1,68	0,00	0,00	5	0
20	0,84	0,22	0,44	10	4
30	0,59	2,00	4,00	20	80
40	0,42	5,55	11,10	30	333
50	0,297	10,86	21,72	40	869
70	0,21	10,72	21,44	50	1072
100	0,149	9,35	18,70	70	1309
140	0,105	5,02	10,04	100	1004
200	0,074	0,66	1,32	140	185
270	0,053	0,14	0,28	200	56
Prato		0,00	0,00	300	0
Total		44,52	89,04		4912



Figura 3. Esquema do processo de cura das peças de concreto.

ficação das propriedades especificadas na ABNT NBR 9780 e outras definidas para o estudo apresentado neste trabalho.

2.2.1. Propriedades das peças de concreto

Segundo SIMIELI *et al* (2007) a norma da ABNT NBR 9781 estipula que a resistência estimada à compressão das peças, calculada de acordo com a norma da ABNT NBR 9780, deve ser de 35 MPa para as solicitações de veículos comerciais de linha ou 50 MPa. Isso quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão. A propriedade de distribuição das cargas vai melhorando com a utilização do pavimento, que produz progressivamente um estado de travamento total

chamado intertravamento (*lock up*). A camada de rolamento adquire maior rigidez com o passar do tempo e as peças pré-moldadas de concreto deixam de constituir mera camada de rolamento para transformar-se numa camada estrutural.

Foram analisadas as propriedades de resistência à compressão, absorção de água, massa específica, índice de vazios, expansão em autoclave e durabilidade por molhagem e secagem.

Para o ensaio de resistência à compressão, seguiram-se os procedimentos da norma da ABNT NBR 9781, a qual estabelece as condições exigíveis para a aceitação de peças pré-moldadas de concreto, destinadas à pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamentos e similares. Os ensaios foram executados no Laboratório de Materiais de Construção, integrado ao De-

Tabela 6. Resultados de resistência à compressão da amostra de peças.

Amostra	Tensão Alcançada (MPa)	Tensão Característica da Peça (MPa)	f_p – resistência média do lote (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente student – t	F_{pk} – resistência característica do lote (MPa)
1	39,44	37,47	37,79	2,132	0,883	35,91
2	39,04	37,09				
3	41,73	39,64				
4	40,74	38,70				
5	37,91	36,01				
6	38,20	36,29				
7	40,14	38,13				
8	39,40	37,43				
9	36,87	35,03				
10	44,34	42,12				

partamento de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina localizado em Joinville – SC. As amostras foram ensaiadas com 45 dias de cura.

Os resultados de resistência à compressão das amostras ensaiadas podem ser observados na Tabela 6.

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma da ABNT NBR 9778:2005. A peça de concreto foi produzida com as dimensões de 60 x 100 x 200 mm.

De acordo com a norma da ABNT NBR 9780 a tensão característica da amostra foi calculada multiplicando-se a tensão máxima alcançada por amostra pelo coeficiente 0,95 – correspondente à altura de 60 mm das peças conforme Tabela 7.

Admite-se que as resistências à compressão obedecem à distribuição normal, sendo o valor característico estimado pela expressão:

$$f_{pk} = f_p - t \cdot s$$

Onde:

f_{pk} = resistência à compressão, em MPa;

f_p = resistência média das amostras ensaiadas de acordo com a NBR 9780, em MPa;

s = desvio padrão da amostra, em MPa;

t = coeficiente de student, fornecidos na Tabela 8, em função do tamanho n da amostra.

Sendo a quantidade de amostras analisadas igual a 10, conseqüentemente o número de amostras n é

Tabela 7. Cálculo da tensão característica da amostra (NBR 9780).

Altura nominal da peça (mm)	Fator multiplicativo “p”
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Tabela 8. Valores do coeficiente de student em função do tamanho n da amostra.

n	t	n	t
6	0,920	18	0,863
7	0,906	20	0,861
8	0,896	22	0,859
9	0,889	24	0,858
10	0,883	26	0,856
12	0,876	28	0,855
14	0,870	30	0,854
16	0,866	32	0,842

igual a 10; e o coeficiente student t é igual a 0,883. Assim sendo, foram obtidos os seguintes resultados:

$$f_{pk} = 35,91 \text{ MPa};$$

$$f_p = 37,79 \text{ MPa};$$

$$s = 2,132 \text{ MPa};$$

$$t = 0,883$$

Com base nos resultados apresentados, foi possível concluir que as peças atendem os requisitos quanto a resistência à compressão, tendo em vista que a

resistência média das amostras foi de 37,79 MPa e o estabelecido em norma é de 35 MPa.

As dimensões das peças, conforme estabelecido na norma da ABNT NBR 9781 que apresenta as variações máximas permissíveis:

- a. 3 mm, no comprimento e largura das peças;
- b. 5 mm, na altura das peças.

Os resultados para as variações nas dimensões das amostras ensaiadas podem ser visualizados na Tabela 9.

Como pode ser observado na Tabela 9, não ocorreram variações maiores que 5 mm para a altura nem variações maiores que 3 mm para comprimento e largura.

Pelos resultados obtidos no estudo de resistência à compressão das peças de concreto contendo em sua composição areia descartada de fundição pode-se concluir que este tipo de artefato é considerado aceito para as solicitações de veículos comerciais de linha.

As peças também foram avaliadas quanto à absorção de água, massa específica e índice de vazios de acordo com a norma da ABNT NBR 9778, sendo que estes ensaios foram realizados na Associação Brasileira de Cimento Portland, localizada em São Paulo.

Foram ensaiadas 4 amostras de peças e estas foram colocadas em estufa mantida à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas. As massas foram registradas (m_s). Em seguida foram imersas em água e mantidas durante 72 horas nessa condição.

Completada a etapa de saturação em água, cada amostra foi colocada em um recipiente cheio de água que foi levado à ebulição. A ebulição foi mantida por um período aproximado de 5 horas, mantendo constante o volume de água. Após a água esfriar, a massa da amostra foi registrada com auxílio da balança hidrostática (m_i).

A amostra foi retirada da água, e após ter sido enxugada com um pano, foi pesada (m_{sat}).

A absorção, o índice de vazios, a massa específica da amostra seca, a massa específica da amostra saturada e a massa específica real são definidos pelas equações:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad I_V = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i}$$

Onde:

A: absorção (%)

I_V : índice de vazios (%)

ρ_s : massa específica da amostra seca

ρ_{sat} : massa específica da amostra saturada

ρ_r : massa específica real

m_s : massa da amostra seca em estufa (g)

m_{sat} : massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g)

m_i : massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g)

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados destes ensaios.

O ensaio de absorção é realizado para medir o volume dos poros. Geralmente se mede a absorção secando uma amostra até massa constante, imergindo em água, determinando-se o acréscimo de massa como porcentagem da massa seca. Ou seja, quanto maior a absorção, maior será a porosidade.

Como o índice de vazios é dado pela relação entre o volume de vazios pelo volume de sólidos, o índice de vazios e a porosidade são diretamente proporcionais.

Tabela 9. Resultados das variações nas dimensões das amostras de peças.

Amostra	Largura L (mm)	Varição de L (mm)	Comprimento C (mm)	Varição de C (mm)	Altura H (mm)	Varição de H (mm)	Maior variação (mm)
1	101,50	0,11	20,20	0,00	59,65	0,81	0,81
2	101,25		20,20		58,65		
3	101,35		20,20		58,75		
4	101,20		20,20		57,20		
5	101,40		20,20		58,95		
6	101,40		20,20		58,95		

Tabela 10. Resultados das determinações de absorção de água, massa específica e índice de vazios das amostras de peças.

Amostras	1	2	3	4	Média
Absorção após imersão e fervura %	6,21	6,07	7,08	7,16	6,6
Índice de vazios após saturação e fervura %	13,83	13,55	18,52	15,86	15,4
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	2,23	2,23	2,21	2,22	2,22
Massa específica após saturação e fervura (g/cm ³)	2,37	2,37	2,36	2,37	2,37
Massa específica real (g/cm ³)	2,59	2,58	2,62	2,63	2,60

Estes valores estão correlacionados à capacidade de prensagem do equipamento de produção e a composição granulométrica da mistura do concreto.

A média dos resultados obtidos do ensaio de absorção de água foi da ordem de 6,6%. A absorção de água tem relação com a compactação da amostra e as condições de cura que a peça esteve submetida. A norma EN 1388 estabelece absorção de água menor ou igual a 6% para as peças de concreto utilizadas em pavimento intertravados.

A massa específica real é a relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis. Portanto, quanto menor a massa específica, mais “leve” é o material. Esta grandeza também está correlacionada com a capacidade de compactação do equipamento, da composição granulométrica e ainda da densidade dos agregados.

Outro fator importante analisado nas peças de concreto com ADF foi verificar a possibilidade de ocorrência de expansão. Para esta verificação foi realizado o ensaio de expansão em autoclave realizado pelo método da ASTM C 151 que consistiu em colocar amostras de peças em autoclave à pressão de 295 Psi e temperatura de 220 °C, durante o período de cinco horas. Após o tratamento, o comprimento final é comparado com o inicial.

A Norma ASTM C 151 – “Standard Performance Specification for Blended Hydraulic Cement” preconiza o critério máximo de 0,8% como limite de estabilidade para um cimento não ser considerado expansivo.

As leituras iniciais das amostras foram respectivamente: altura = 56,5 mm; largura = 101,5 mm e comprimento = 201,4 mm. As leituras finais foram: altura = 57,0; largura = 101,8 mm e comprimento = 201,6 mm.

Os resultados mostram que os valores de expansões estão abaixo do limite máximo de 0,8% preconizado pela ASTM C 151, além de que não foram observadas nenhuma ocorrência de fissuração ou lascamento da amostra.

As amostras foram também submetidas ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, simulando ciclos que poderiam causar a desagregação do concreto. Este ensaio consistiu na execução de seis ciclos alternados de molhagem e secagem (cada ciclo de 48 horas). O método de envelhecimento acelerado foi baseado na norma Norma ABNT – NBR 13554, utilizada na verificação de durabilidade de solo-cimento.

O ensaio consiste na verificação de desgaste mecânico após ciclos de molhagem e secagem. Após a secagem em estufa as amostras foram submetidas ao escovamento com escova de tiras de chapa de aço, descrita pela NBR 13554. A escova foi aplicada com seu eixo longitudinal paralelo ao eixo longitudinal do corpo de prova e paralelo as suas bases, de maneira tal que foi possível cobrir toda a superfície do corpo de prova. Na Tabela 11 estão apresentados os resultados deste ensaio.

As peças ensaiadas não apresentaram desgastes significativos e visivelmente não apresentavam fissuras e nem partículas soltas.

Tabela 11. Resultados do Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem.

Amostras	1	2	3
Massa seca inicial (g)	2718	2730	2725
Massa seca final (g)	2704	2713	2711
Perda de massa (%)	0,5	0,6	0,5

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado no presente trabalho mostrou que é possível utilizar a Areia Descartada de Fundação – ADF como agregado na confecção de peças de concreto para pavimentação.

Obtiveram-se peças com excelente acabamento, possibilitando a execução de um pavimento diferencia-



Figura 4. Execução de pavimentação com as peças de concreto com ADF no entorno do 62º Batalhão de Infantaria de Joinville.

do e de aspecto arquitetônico bastante agradável, ideal para confecção de calçadas, pavimentação de ruas de baixo tráfego e espaços urbanos.

Além do atendimento da resistência mecânica, os ensaios de expansão e ciclos de molhagem e secagem demonstraram que as peças de concreto com ADF apre-

sentam durabilidade nos ensaios acelerados. As análises ambientais e de toxicidade permitiram a obtenção da Certidão Ambiental nº 964876/2009 fornecida pela Fundação de Meio Ambiente de Santa Catarina – FATMA autorizando a fabricação deste artefato.

Com a obtenção da Certidão Ambiental foi possível iniciar a fabricação das peças sendo possível formalizar uma parceria com a Prefeitura Municipal de Joinville onde já foram doados cerca de 6.300 m² para a realização de reformas de calçadas na cidade.

A Figura 4 ilustra a colocação das peças de concreto com ADF, na calçada do entorno do 62º Batalhão de Infantaria de Joinville.

O emprego da areia descartada de fundição como agregado para a fabricação de peças de concreto para pavimento ou outros tipos de artefatos de cimento se constitui em uma alternativa viável, devido aos resultados obtidos, conciliando os aspectos técnicos dos artefatos com benefícios ambientais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho gostariam de registrar os seus agradecimentos às seguintes instituições: TUPY S.A., UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA e ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM C 151 – Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement. Philadelphia, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Manual Técnico para Implementação da Habitação 10. São Paulo, 2002, 88p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. – ABIFA. Disponível em: <http://www.abifa.org.br/IndicesMercado.aspx>. Acesso em 09/08/2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Agregado para Concreto – Especificação – NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Método de Ensaio – NBR 9778. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Peças de Concreto para Pavimentação – Determinação da Resistência à Compressão – Método de Ensaio – NBR 9780. Rio de Janeiro, 1987.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Peças de Concreto para Pavimentação – Especificação – NBR 9781. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Resíduos Sólidos – Classificação – NBR 10.004/2004. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Lixiviação de Resíduos – Procedimento – NBR 10.005 / 2004. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Solubilização de Resíduos – Procedimento – NBR 10.006 / 2004. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio – NBR 13554. Rio de Janeiro, 1996.
- BINA, Paulo; ALVES, José H.; BONIN, André L.; YOSHIMURA, Humberto N. Metodologia de Análise e Aprovação de Utilização de Rejeitos Industriais na Construção Civil: Estudo de Caso de Uso de Areia de Fundição de Descarte para Pavimentação. Monobeton Soluções Tecnológicas Ltda – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT. São Paulo, 2000.
- BONET, Ivan Ideraldo. Valorização do Resíduo Areia de Fundição (RAF). Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo CBUQ. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.
- BONIN, André Luís. Reutilização da Areia Preta de Fundição na Construção Civil. *Congresso de Fundição*. São Paulo, p-203-221. Setembro, 1995.
- CARNIN, Raquel Luísa Pereira. Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas. Tese de doutorado do Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas. UFPR, 2008, 152p.
- COUTINHO, Benedito Neto. Avaliação do Reaproveitamento de Areia de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado (Engenharia de Transportes). Universidade de São Carlos. São Carlos, 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Concrete paving blocks – Requirements and test methods. EN 1338. Brussels, 2003.
- PEREIRA, Raquel Luísa. Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas. Relatório de doutorado apresentado ao Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas. UFPR, 2005.
- Portaria FATMA nº 17. Estabelece os Limites Máximos de Toxicidade Aguda para efluentes de diferentes origens e dá outras providências. Fundação do Meio Ambiente - FATMA, 2002, 3p.
- RESOLUÇÃO CONSEMA 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, 2008, 14p.
- SCHULZ, Marco Aurélio. Valorização de Resíduos Sólidos Provenientes da Indústria de Fundição: Estudo na Produção de Artefatos de Concreto para Construção civil. Universidade da Região de Joinville. Monografia de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental. 126 pag. 2005.
- SIMIELI, Daniel; MIZUMOTO, Camilo; SEGANTINI, Anderson da Silva; MOREIRA, Flávio. Utilização de Agregados Recicladados em Pavimentos Intertravados. *Revista Exata*. Centro Universitário Nove de Julho. São Paulo, 2007, 10p.
- STEFENON, Fernando. Incorporação de Resíduos Industriais em Concreto Betuminoso Usinado à Quente. Universidade de Caxias do Sul. Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Caxias do Sul, 2003.