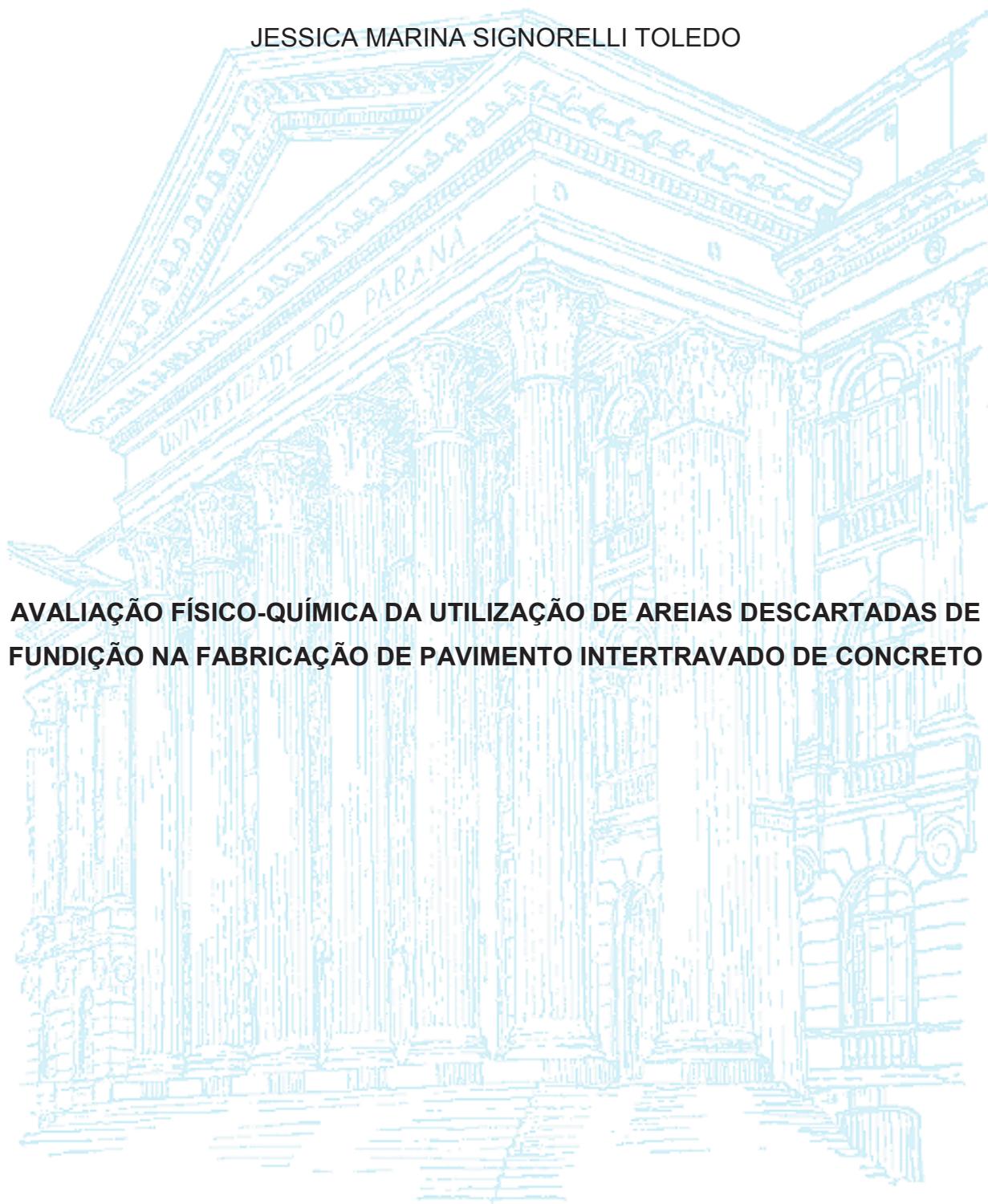


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JESSICA MARINA SIGNORELLI TOLEDO



**AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA UTILIZAÇÃO DE AREIAS DESCARTADAS DE
FUNDIÇÃO NA FABRICAÇÃO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO**

CURITIBA

2017

JESSICA MARINA SIGNORELLI TOLEDO

**AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA UTILIZAÇÃO DE AREIAS DESCARTADAS DE
FUNDIÇÃO NA FABRICAÇÃO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto.

Co-orientadora: Prof. Dra. Mariana d'Orey Gaivão Portella Bragança.

CURITIBA

2017

T649a Toledo, Jessica Marina Signorelli
Avaliação físico-química da utilização de areias descartadas de fundição na fabricação de pavimento intertravado de concreto / Jessica Marina Signorelli Toledo. – Curitiba, 2017.
131 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2017.

Orientador: Carlos Itsuo Yamamoto. - Coorientador: Mariana d'Orey Gaivão Portella Bragança.
Bibliografia: p. 123-131.

1. Areia de fundição. 2. Pavimento. 3. Classificação de resíduo sólido.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Yamamoto, Carlos Itsuo
III. Bragança, Mariana d'Orey Gaivão Portella. IV. Título.

CDD: 620.11



ATA Nº328

**ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE Mestrado PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

No dia sete de Março de dois mil e dezessete às 08:30 horas, na sala Auditório Inferior da Engenharia Química, UFPR Centro Politécnico, foram instalados os trabalhos de arguição da mestranda **JESSICA MARINA SIGNORELLI TOLEDO** para a Defesa Pública de sua dissertação intitulada **AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA UTILIZAÇÃO DE AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO NA FABRICAÇÃO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO**. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: CARLOS ITSUO YAMAMOTO (UFPR), VITOLDO SWINKA FILHO (UFPR), ANDRÉ NAGALLI (UTFPR). Dando início à sessão, a presidência passou a palavra a discente, para que a mesma expusesse seu trabalho aos presentes. Em seguida, a presidência passou a palavra a cada um dos Examinadores, para suas respectivas arguições. A aluna respondeu a cada um dos arguidores. A presidência retomou a palavra para suas considerações finais e, depois, solicitou que os presentes e a mestranda deixassem a sala. A Banca Examinadora, então, reuniu-se sigilosamente e, após a discussão de suas avaliações, decidiu-se pela APROVAÇÃO da aluna. A mestranda foi convidada a ingressar novamente na sala, bem como os demais assistentes, após o que a presidência fez a leitura do Parecer da Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, CARLOS ITSUO YAMAMOTO, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora.

CURITIBA, 07 de Março de 2017.


CARLOS ITSUO YAMAMOTO
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


VITOLDO-SWINKA FILHO
Avaliador Interno (UFPR)


ANDRÉ NAGALLI
Avaliador Externo (UTFPR)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Carlos (*in memoriam*) e Edna, exemplos de dedicação, zêlo e determinação que levo comigo, e ao meu noivo, Phelipe, que acompanha meus passos e me encoraja para novas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus. Sem Ele nada seria possível.

Ao orientador, Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto, por me guiar na vida acadêmica, tornando os caminhos menos penosos e mais claros.

A coorientadora Dra. Mariana d'Orey Gaivão Portella Bragança que, sempre com muita paciência e paixão pela pesquisa, sanou todas as minhas dúvidas, me auxiliando na interpretação dos resultados, permitindo o meu crescimento e a realização deste trabalho.

Aos amigos do Lacaut ets, em especial, a Cintia, parceira na bancada e amiga nos intervalos da pesquisa.

Aos técnicos do LAMIR, em especial, ao Ivan, Marcelo, Rodrigo, Franciele e Elisiane, sempre prontos a auxiliar e sanar minhas dúvidas.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR, pelos ótimos serviços prestados com cordialidade.

Ao LAME, dos Institutos Lactec, em especial, Betina, por zelar pelos meus ensaios e protocolos a seguir, ao Jeferson, Bruno e Evandro, por estarem sempre prontos a ajudar.

À Universidade Federal do Paraná, em especial, o Prof. Dr. Cristovão Fernandes e Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto, pelo apoio financeiro à pesquisa, garantindo o alto padrão dos ensaios desenvolvidos neste estudo.

À Capes pelo investimento em meu desenvolvimento acadêmico.

À família Minatti, Voigt, Nagai e todos os fundidores envolvidos por confiar no meu trabalho e na possibilidade de um mundo mais sustentável, em especial, ao Sr. Jair Minatti pelo apoio, cautela e carinho para que este estudo fosse desenvolvido com primor me auxiliando com tudo que estava ao seu alcance.

Ao Rodrigo e sua equipe da INPREART, em especial, ao Alexandre, que abriram as portas para investir seu tempo e colaboradores nesta nova possibilidade.

Aos meus irmãos Carlos Augusto, Bruno Augusto e Luiz Augusto, os melhores amigos que terei, que acreditam em mim e participam de meu aprendizado.

Às minhas avós, Teresinha e Luziana (*in memoriam*), pelas intensas orações, mesmo que a distância, e elogios de admiração quando estávamos próximas. A

Aneli, pelo apoio e parceria de sogra e amiga. A todos os meus familiares pela torcida.

À minha mãe e melhor amiga, Edna, por me revelar o mundo do reaproveitamento de resíduos industriais possibilitando um futuro melhor para as próximas gerações. Também por ser mãe, conselheira, minha melhor amiga e me amparar nos momentos em que meu coração se encontrava mais angustiado.

Ao meu pai, Carlos Signorelli Toledo (*in memoriam*), que mesmo de longe, abre meus caminhos e zela por mim nos momentos difíceis, clareando minhas dúvidas e incentivando para novos aprendizados. Por seu exemplo de determinação e otimismo.

Ao meu amor, Phelipe, por sempre estar ao meu lado, me acompanhando nos momentos que já se passaram e os que ainda virão.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho, minha gratidão.

“Tudo é um aprendizado.”
(Carlos Signorelli Toledo)

RESUMO

A areia de fundição é largamente utilizada na obtenção de peças metálicas em todo o mundo. Dependendo da natureza química de seus aglomerantes e das variáveis do processo ao qual é empregada, pode ser regenerada e reutilizada. No entanto, chega-se ao ponto em que esta deve ser descartada ou causará queda da qualidade das peças fundidas finais. Com o intuito de verificar a viabilidade técnica e ambiental de alternativas para a aplicação da Areia Descartada de Fundição (ADF) ao setor construtivo, neste trabalho foram estudados as ADF Silicato, ADF Fenólica e ADF Verde, provenientes de fundidoras da região metropolitana de Curitiba, como substituinte da areia fina (AF) empregada na fabricação de peças de concreto para a pavimentação. As ADFs foram caracterizadas físico-quimicamente pelos ensaios de difração de raios X, fluorescência de raios X, análise granulométrica, absorção de água, massa específica, reatividade álcali-agregado, microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva (MEV-EDS) e os ensaios ambientais de lixiviação e solubilização conforme normas brasileiras vigentes. Avaliaram-se também nos corpos de prova os requisitos técnicos necessários para a utilização da ADF pelos ensaios de inspeção visual, análise dimensional, absorção de água, resistência à compressão axial e resistência à abrasão. A tendência dos resultados foi verificada por análise de variância. Das três ADFs analisadas, verificou-se que a mais próxima dos resultados da AF é a ADF Verde. Esta apresentou resistência característica à compressão axial, em 28 dias, de 33,3 MPa, muito próxima à requerida por norma, de 35 MPa. Também apresentou bons resultados quanto à reatividade álcali-agregado (RAA), com valores dentro dos limites de 0,19% de variação dimensional aos 30 dias de ensaio acelerado, sendo, portanto, adequada para a aplicação em concreto. No ensaio de lixiviação e solubilização da peça final, a ADF Verde, como agregado, não apresentou contaminação acima da fixada pela norma vigente. Entretanto, as demais ADFs não foram consideradas apropriadas, na proporção de substituição utilizada de 12% na aplicação em pavimentação intertravada, por apresentar reatividade álcali-agregado no caso da ADF Silicato, e concentrações no extrato solubilizado de fenóis totais acima da permitida por norma para a ADF Fenólica. Estas também apresentaram resistência à compressão característica, aos 28 dias de idade, inferior à definida por norma, em 30,4 e 27,1 MPa, respectivamente. A análise morfológica, efetuada por MEV indicou a ocorrência de microfissuração em mapa, em determinadas regiões das amostras de ADF Silicato e ADF Fenólica, caracterizando reação álcali-agregado nessas amostras. Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram a possibilidade da reutilização da ADF Verde como forma de reduzir o volume de descarte a aterros, pois a mesma apresentou propriedades adequadas para a aplicação em pavimentos intertravados de concreto na proporção de substituição estudada.

Palavras-chave: Areia de fundição; reaproveitamento; pavimento; classificação de resíduo sólido.

ABSTRACT

Foundry sand is widely used in the casting of metal parts all over the world. Depending on the chemical nature of its binders and the process variables employed, it can be regenerated and reused. However, it comes to the point where it should be discarded or it will result in the loss of quality of the final castings. In order to verify the technical and environmental feasibility of alternatives for Waste Foundry Sand (WFS) application for the construction sector, this work studied Silicate WFS, Phenolic WFS and Green WFS, used at the foundries of the metropolitan region of Curitiba, as substitute for fine aggregate used in the manufacture of concrete parts for paving. The WFSs were physico-chemically characterized by X-ray diffraction, X-ray fluorescence, particle size analysis, water absorption, specific gravity, alkali-aggregate reactivity, scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM/EDS), environmental leaching and solubilization tests, according to Brazilian standards. The technical requirements for the use of WFS were also evaluated through visual inspection, dimensional analysis, water absorption, axial compression strength and abrasion resistance tests. The results were verified by analysis of variance. Out of the three WFSs analyzed, this research stated that the results closest to the fine aggregate is the Green WFS, with an axial compression strength at 28 days of 33.3 MPa, roughly the required standard of 35 MPa. It also presented good results regarding the alkali-aggregate reactivity (AAR), with values within the limits of 0.19% of dimensional variation at 30 days of accelerated test, being therefore suitable for concrete casting application. At the leaching and solubilization tests of the final cast part, the green WFS, as an aggregate, did not present contamination above that established by the current norm. However, the remaining WFSs were not considered adequate, in the proportion of substitution of 12% used in interlocked paving application, due to the presence of alkali-aggregate reactivity in the case of Silicate WFS, and solubilized concentrations of total phenols above allowed per standard for the Phenolic WFS. These also presented characteristic compressive strength, at 28 days of age, lower than that defined by standard regulations, of 30.4 and 27.1 MPa, respectively. The morphological analysis, performed through SEM/EDS, indicated an occurrence of map cracking in regions of the samples of Silicate WFS and Phenolic WFS, characterizing AAR in these samples. The results obtained in this study evidenced a possible reuse of the Green WFS as a form of diminishing the volume of disposal to landfills, since it presented suitable properties for an application in concrete pavements in the proportion of substitution studied.

Key-words: Foundry sand; reuse; paving; solid waste classification.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO	27
FIGURA 2.2 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM MOLDAGEM A AREIA	29
FIGURA 2.3 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM PONTOS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS.....	31
FIGURA 2.4 - ESTRUTURAS CARACTERÍSTICAS DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	50
FIGURA 2.5 - DETERIORAÇÃO DO CONCRETO POR EFEITOS FÍSICOS.....	52
FIGURA 2.6 - FISSURAÇÃO EM FUNDAÇÕES AFETADOS PELA RAA.....	55
FIGURA 3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO	61
FIGURA 3.2 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	71
FIGURA 3.3 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	74
FIGURA 3.4 - ENSAIO DE ABRASÃO EM PAVERS	76
FIGURA 3.5 - PREPARO DAS AMOSTRAS DE PAVIMENTO PARA ANÁLISE NO MEV	77
FIGURA 3.6 - ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PAVERS	78
FIGURA 3.7 - ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PAVERS	79
FIGURA 4.1 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DA AF.....	81
FIGURA 4.2 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X SOBREPOSTOS DAS AMOSTRAS DE AF E ADFs	82
FIGURA 4.3 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DAS AF E ADFs.....	82
FIGURA 4.4 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS ADFS E AF.....	85
FIGURA 4.5 - RESULTADOS DO ENSAIO DE REATIVIDADE ÁLCALI AGREGADO NAS AMOSTRAS DE ADFS E AF	89
FIGURA 4.6 - MICROGRAFIAS AF	90
FIGURA 4.7 - MICROGRAFIAS ADF SILICATO.....	91
FIGURA 4.8 - MICROGRAFIAS ADF FENÓLICA.....	92
FIGURA 4.9 - MICROGRAFIAS ADF VERDE.....	93
FIGURA 4.10 - ESPECTROS DE DISPERSÃO DE ENERGIA COM INTENSIDADES RELATIVAS E SOBREPOSTOS DAS AMOSTRAS DE ADFS E AF.....	94
FIGURA 4.11 - ESPECTROS DE DISPERSÃO DE ENERGIA DESLOCADOS DAS AMOSTRAS DE AF E ADFS.....	94

FIGURA 4.12 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DESLOCADOS DOS PAVIMENTOS COM ADFs E AF	98
FIGURA 4.13 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DOS PAVIMENTOS COM ADFs E AF	99
FIGURA 4.14 - RUGOSIDADES NAS AMOSTRAS DE PAVER AF.....	101
FIGURA 4.15 - RUGOSIDADES NAS AMOSTRAS DE PAVER ADF SILICATO.	101
FIGURA 4.16 - RUGOSIDADES NAS AMOSTRAS DE PAVER ADF FENÓLICA	102
FIGURA 4.17 - RUGOSIDADES NAS AMOSTRAS DE PAVER ADF VERDE	102
FIGURA 4.18 - CORPOS DE PROVA NA INSPEÇÃO VISUAL: ADF SILICATO, ADF FENÓLICA, ADF VERDE E AF	103
FIGURA 4.19 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO NAS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS	104
FIGURA 4.20 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO CARACTERÍSTICA DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO NAS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS.....	105
FIGURA 4.21 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA A COMPRESSÃO AOS 28 DIAS	106
FIGURA 4.22 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS PAVIMENTOS NAS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS.....	107
FIGURA 4.23 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO	108
FIGURA 4.24 - MICROGRAFIAS DE MEV DOS PAVIMENTOS COM IDADE DE 89 DIAS A MAGNIFICAÇÃO DE 50X.....	110
FIGURA 4.25 - MICROGRAFIAS DE MEV DOS PAVIMENTOS COM IDADE DE 194 DIAS A MAGNIFICAÇÃO DE 100x.....	111
FIGURA 4.26 - MICROGRAFIAS DE MEV DOS PAVIMENTOS COM IDADE DE 194 DIAS A MAGNIFICAÇÃO DE 5000x.....	112
FIGURA 4.27 - MICROGRAFIAS DE MEV DOS PAVIMENTOS ADF SILICATO E ADF FENÓLICA COM EVIDÊNCIAS DE RAA	113
FIGURA 4.28 - MICROGRAFIAS DE MEV DE POROS NOS PAVIMENTOS COM IDADE DE 194 DIAS	114
FIGURA 4.29 - ESPECTROS DE DISPERSÃO DE ENERGIA COM INTENSIDADES RELATIVAS E SOBREPOSTOS DAS AMOSTRAS DE PAVIMENTO INTERTRAVADO FABRICADAS COM IDADE DE 89 DIAS	115

FIGURA 4.30 – ESPECTROS DE DISPERSÃO DE ENERGIA DESLOCADOS DAS AMOSTRAS DE PAVIMENTO INTERTRAVADO FABRICADAS COM IDADE DE 89 DIAS.....	115
--	-----

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO	28
QUADRO 2.2 - CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS CONFORME NBR 10.004/2004	39
QUADRO 2.3 - ESTRUTURAS FORMADAS NA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO, SUAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES	51
QUADRO 2.4 - MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NO CONCRETO POR EFEITOS QUÍMICOS	54
QUADRO 2.5 - MECANISMOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DE ADFS, OBTIDA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	33
TABELA 2.2 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DO LIXIVIADO EM ADFS	40
TABELA 2.3 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DO SOLUBILIZADO EM ADFS.....	41
TABELA 2.4 - USOS E PRÁTICAS PARA APLICAÇÃO DE ADF	45
TABELA 3.1 - RESULTADO DE ANÁLISE QUÍMICA DA RESINA DE SILICATO DE SÓDIO.....	62
TABELA 3.2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL DO CIMENTO CP-II F UTILIZADO NA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	64
TABELA 3.3 - PARÂMETROS PARA EXTRATO LIXIVIADO	68
TABELA 3.4 - PARÂMETROS PARA EXTRATO SOLUBILIZADO	69
TABELA 3.5 - DOSAGEM DOS TRAÇOS ESTUDADOS	70
TABELA 3.6 - TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS DAS PEÇAS DE CONCRETO ...	73
TABELA 4.1 - COMPOSIÇÃO MINERAL DA AF	81
TABELA 4.2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS - X DAS ADFs E AF	84
TABELA 4.3 - PORCENTAGENS DE PASSANTES EM ENSAIO DE GRANULOMETRIA NAS AMOSTRAS DE ADFS E AF	86
TABELA 4.4 - RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA DAS AMOSTRAS DE ADFs E AF.	87
TABELA 4.5 - RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS AMOSTRAS DE ADFs E AF	88
TABELA 4.6 - RESULTADOS PARA EXTRATO LIXIVIADO DAS ADFS	95
TABELA 4.7 - RESULTADOS PARA EXTRATO SOLUBILIZADO DAS ADFS.....	97
TABELA 4.8 - COMPOSIÇÃO MINERAL DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO ...	99
TABELA 4.9 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS - X DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO	100
TABELA 4.10 - ANÁLISE DIMENSIONAL DOS PAVIMENTOS.....	103
TABELA 4.11 - RESULTADOS PARA EXTRATO LIXIVIADO DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO.....	116
TABELA 4.12 - RESULTADOS PARA EXTRATO SOLUBILIZADO DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIFA	-	Associação Brasileira de Fundição
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	-	água/cimento
ADF	-	Areia descartada de fundição
AF	-	Areia fina
CCV	-	Concreto convencional
CETESB	-	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	-	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	-	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CP	-	Cimento portland
CPAD	-	Centrais de processamento, armazenamento e disposição
C-S-H	-	Silicato de cálcio hidratado
DRX	-	Difração de raios-X
EDS	-	Espectroscopia por dispersão de energia de raios X
FRX	-	Fluorescência de raios-X
IAP	-	Instituto Ambiental do Paraná
HRC	-	Concreto de alta resistência
IBAMA	-	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
LACAUT	-	Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos
LACTEC	-	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAMIR	-	Laboratório de Minerais e Rochas
MEV	-	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	-	Norma Brasileira
PAVER	-	Pavimento intertravado de concreto
pH	-	Potencial hidrogeniônico
RAS	-	Reação álcali-sílica
RASS	-	Reação álcali-silicato
RAC	-	Reação álcali-carbonato
SiO ₂	-	Óxido de silício
TCFA	-	Taxa de Controle e Fiscalização Ambiental
f_p	-	Resistência média das peças [MPa];

- f_{pi} - Resistência individual das peças [MPa];
- $f_{pk\ est}$ - Resistência característica estimada à compressão [MPa];
- n - Número de peças da amostra;
- s - Desvio-padrão da amostra [MPa];
- t - Coeficiente t de Student.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	Objetivo geral	24
1.1.2	Objetivos específicos.....	24
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....	27
2.1.1	Resíduos de areia descartada de fundição no mundo	31
2.1.2	Tópicos de legislação ambiental nacional e estadual para os resíduos sólidos 35	
2.1.3	Normas técnicas sobre a ADF.....	38
2.1.4	Alternativas de reuso da ADF no Brasil e no mundo	41
2.1.5	Reuso da ADF na pavimentação de concreto	46
2.2	CONCRETO E AGREGADOS.....	48
2.2.1	Concreto	48
2.2.2	A hidratação do cimento	49
2.2.3	Desgastes por efeitos físicos e químicos no concreto	51
2.2.4	Normas NBR 9781:2013 e 15577-4:2008.....	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS	61
3.1.1	Areia descartada de fundição aglomerada com silicato de sódio	62
3.1.2	Areia descartada de fundição aglomerada com resina fenólica	63
3.1.3	Areia descartada de fundição a verde	63
3.1.4	Cimento	63
3.1.5	Agregados	64
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	64
3.2.1	Análise mineralógica – difração de raios X.....	65
3.2.2	Análise química – fluorescência de raios X	65
3.2.3	Análise granulométrica	65
3.2.4	Massa específica	66
3.2.5	Absorção de água.....	66
3.2.6	Reatividade álcali-agregado	66
3.2.7	Microscopia eletrônica de varredura com análise química elementar	67

3.2.8	Ensaio de lixiviação	67
3.2.9	Ensaio de solubilização	68
3.3	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	70
3.4	AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	71
3.4.1	Análise mineralógica – difração de raios X	72
3.4.2	Análise química – fluorescência de raios X.....	72
3.4.3	Inspeção visual	72
3.4.4	Análise dimensional	72
3.4.5	Resistência à compressão axial.....	73
3.4.6	Absorção de água	75
3.4.7	Resistência à abrasão.....	76
3.4.8	Microscopia eletrônica de varredura com análise química elementar.....	77
3.4.9	Ensaio de lixiviação	77
3.4.10	Ensaio de solubilização	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	81
4.1.1	Análise mineralógica por difração de raios X	81
4.1.2	Análise química por fluorescência de raios X	83
4.1.3	Análise granulométrica.....	84
4.1.4	Massa específica	86
4.1.5	Absorção de água	87
4.1.6	Reatividade álcali-agregado.....	89
4.1.7	Microscopia eletrônica de varredura com análise química elementar.....	90
4.1.8	Ensaio de lixiviação	95
4.1.9	Ensaio de solubilização	96
4.2	AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	98
4.2.1	Análise mineralógica por difração de raios X	98
4.2.2	Análise química por fluorescência de raios X	100
4.2.3	Inspeção visual	100
4.2.4	Análise dimensional	103
4.2.5	Resistência à compressão axial.....	104
4.2.6	Absorção de água	107
4.2.7	Resistência à abrasão.....	108
4.2.8	Microscopia eletrônica de varredura com análise química elementar.....	109

4.2.9	Ensaio de lixiviação	116
4.2.10	Ensaio de solubilização	117
5	CONCLUSÕES	119
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
	REFERÊNCIAS.....	123

1 INTRODUÇÃO

Os processos industriais geram produtos a partir de matérias primas essenciais para o atendimento de nossas necessidades, mas também são fonte geradora de subprodutos e resíduos potencialmente prejudiciais ao meio ambiente. Embora a indústria seja de importância fundamental à economia do país, a quantidade e/ou a periculosidade dos resíduos sólidos que são produzidos podem ter consequências irremediáveis. Esse é o caso dos resíduos da indústria de fundição, sendo o mais volumoso a areia descartada de fundição (ADF), resultante da produção dos moldes e machos para a de peças metálicas. A produção nacional deste resíduo é de três milhões de toneladas/ano (ABIFA, 2013). Já são utilizadas maneiras de recuperar a areia de fundição, possibilitando que ela retorne à produção de peças fundidas, caracterizando a reciclagem interna. No entanto, o reuso contínuo da mesma acaba formando imperfeições nas peças fundidas, devido ao acúmulo de compostos na superfície dos grãos que alteram as características da areia do molde, acarretando no surgimento de problemas de qualidade nos produtos finais (LOPES, 2009). Por esse motivo, faz-se necessário que a areia seja substituída por uma nova carga, gerando um volume substancial de resíduo sólido.

A destinação final da ADF tem sido feita em aterros sanitários industriais, podendo também ser empregada como camada intermediária dos resíduos dispostos, por serem caracterizadas, em sua maioria, como Resíduo Não Perigoso Classe II - A Não Inerte, segundo a Norma Brasileira NBR 10.004:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O custo aproximado, por tonelada, para disposição de materiais residuais classificados como Classe II pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) em aterro industrial da região metropolitana de Curitiba é da ordem de R\$ 280,00. Estimando que toda a carga de ADF fosse corretamente destinada a aterros o custo para dispor este resíduo resultaria em um montante de, aproximadamente, 840 milhões de reais anuais.

A extração da areia natural para a aplicação na construção civil, juntamente com o acúmulo de ADF em aterros, gera impactos ambientais significativos (CARNIN, 2010). Do ponto de vista ambiental e também econômico, o reaproveitamento da ADF se torna interessante e poderia ser incentivado para a redução da quantidade de areia extraída da natureza.

De modo a reduzir as cargas aplicadas em aterros e o custo da disposição da ADF, outros estudos têm sido realizados no intuito de destinar corretamente este resíduo, sendo a reciclagem externa uma opção interessante. Pode ser utilizada na fabricação de artefatos de concreto, cerâmicos, aplicação em asfalto e como camada intermediária em aterros sanitários, dentre outras destinações.

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou a verificação da viabilidade técnica e ambiental da utilização de ADF como agregado na fabricação de pavimento intertravado de concreto, a partir de traço comercial fornecido, proporcionando a substituição da areia fina (AF). Em vista disso, busca-se possibilitar a redução da extração de areia para a construção civil e a aplicação de resíduos potencialmente prejudiciais ao meio ambiente como matérias prima para outros produtos com valor comercial, sem função estrutural.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade técnica e ambiental da utilização de areias descartadas de fundição para a fabricação de pavimento intertravado de concreto (paver) fundamentadas nas normas brasileiras vigentes.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- caracterizar, físico-quimicamente, amostras de três ADFs, obtidas a partir de fundidoras localizadas na Região Metropolitana de Curitiba por meio de ensaios de DRX, FRX, MEV com EDS, granulometria, massa específica, absorção de água, lixiviação e solubilização.
- averiguar a viabilidade técnica da utilização dos pavimentos intertravados de concreto, com a fabricação de peças contendo ADF em substituição à AF, produzidos conforme as especificações da norma ABNT NBR 9781/2013 - Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio;
- avaliar o efeito de constituintes presentes nas ADFs em características dos pavimentos intertravados de concreto finais;

- avaliar a reatividade das três ADFs como agregados na fabricação do pavimento intertravado de concreto;
- verificar a viabilidade ambiental da utilização do pavimento intertravado de concreto, conforme os requisitos da norma ABNT NBR 10.004/2004 - Resíduos sólidos – Classificação.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para melhor compreensão, o trabalho está estruturado em seis capítulos.

No primeiro capítulo está apresentado o contexto da pesquisa, evidenciando os motivos pelos quais esta se faz importante, e os objetivos a serem alcançados com o presente estudo.

No segundo capítulo, está apresentada uma revisão da literatura sobre os fundamentos do processo de geração do resíduo de ADF e estudos realizados na área; o concreto, seus agregados e características; e normas e legislações aplicáveis sobre os assuntos.

No terceiro capítulo foi abordada a metodologia do estudo realizado, a descrição dos resíduos utilizados e os ensaios aos quais foram submetidas às ADFs e os produtos fabricados com as mesmas.

No quarto capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios descritos no capítulo três.

E, finalmente, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões sobre o estudo e recomendações para trabalhos futuros.

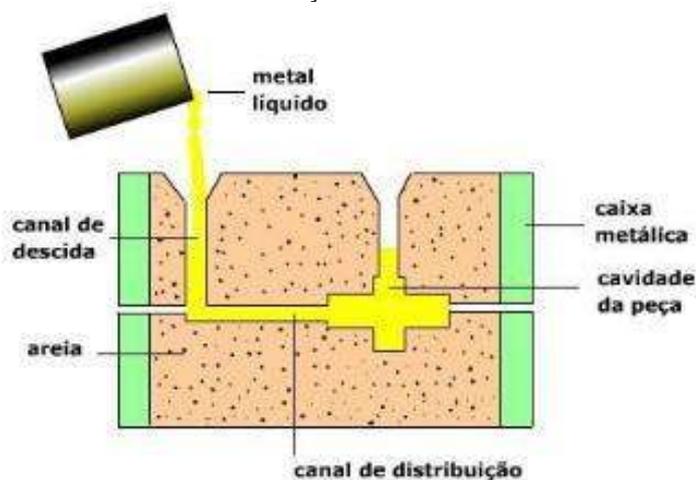
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma revisão dos temas relevantes para o entendimento do processo de fundição, as matérias primas e os resíduos descartados. Adicionalmente, são apresentados estudos de reaproveitamento das ADFs no Brasil e no mundo. Se tratando do presente estudo uma aplicação da ADF como substituinte parcial em artefatos de concreto, elucida-se ainda neste capítulo sobre a estrutura e propriedades desse material, pertinentes à pavimentação.

2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição consiste em verter um metal ou liga metálica no estado líquido no interior de um molde que possui a forma da peça desejada (FIGURA 2.1). Este processo se faz eficiente quando a peça desejada é complexa devido à presença de cavidades internas, dificultando a utilização de outra metodologia (GUERINO, 2010).

FIGURA 2.1 – REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO



FONTE: Penkaitis (2012).

Para Fagundes (2010) o setor de fundição é considerado o mais versátil na conformação de metais, já que há uma vasta variedade de formatos, dimensões e propriedades metalúrgicas das peças fundidas. Assim, este setor torna-se mais interessante do ponto de vista técnico e econômico para a obtenção de peças metálicas.

A classificação quanto aos processos de produção de fundidos, pode ser realizada, segundo Ferreira (1999), de acordo com a natureza dos materiais utilizados na fabricação das moldações e dos modelos que darão origem à cavidade da moldação ou ao molde das peças a serem produzidas. No QUADRO 2.1 está apresentada a classificação dos processos de fundição.

QUADRO 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

- 1) Processos de moldação perdida / Modelo permanente
 - (a) Processo de fundição com moldação em Areia:
 - Processo de moldação em areia a verde.
 - Processo de moldação em areia seca.
 - Processo de moldação com CO₂/Silicato.
 - Processo de moldação em "*Shell-Moulding*".
 - Processo de moldação de Caixa Fria.
 - Processo de moldação de selagem por vácuo.
 - (b) Processo de fundição com moldação em agregado refratário:
 - Processo de moldação com cerâmica.
 - Processo de moldação com gesso.
- 2) Processos de moldação perdida / Modelos perdidos
 - (a) Processo de fundição com moldação em Areia:
 - Processo de moldação com modelo evaporável.
 - (b) Processo de fundição com moldação em agregado refratário:
 - Processo de moldação por modelos perdidos.
- 3) Processos com moldação permanente
 - (a) Processo em moldações metálicas:
 - Processo de vazamento por gravidade em moldações metálicas.
 - Processo de vazamento sob pressão em moldações metálicas.
 - Processo de vazamento sob baixa-pressão em moldações metálicas.
 - (b) Processo de vazamento por centrifugação.
 - (c) Processo de vazamento em moldações com pressões contra-gravíticas.
 - (d) Processo de vazamento em moldações metálicas por compressão mecânica.
 - (e) Processo de vazamento contínuo em moldações metálicas.

FONTE: Ferreira (1999).

A fundição com moldagem em areia, apesar de ter origem remota, ainda é o método mais utilizado para obtenção de peças fundidas (KLINSKY, 2013). De acordo com Hermann, Reinert e Duarte (2014), o processo mais utilizado na fabricação de peças em ferro fundido cinzento e nodular, que representam grande parcela dos fundidos produzidos, são os de areia a verde e areia ligada quimicamente, devido a sua alta empregabilidade e baixo custo, em comparação aos demais processos como cera perdida ou por moldes permanentes. As etapas da fundição em areia são apresentadas pelo fluxograma da FIGURA 2.2.

FIGURA 2.2 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM MOLDAGEM A AREIA



FONTE: Chegatti (2004).

Na etapa de modelação é confeccionado um modelo, uma réplica da peça desejada a ser fundida, com dimensões identificadas compensadas pela contração e usinagem. Esta réplica é fabricada, geralmente, em madeira, metal, resina (CHEGATTI, 2016). Há, então, a seleção das caixas e das areias a serem

empregadas no processo de fundição, escolhidas conforme tipo de liga fundida, tecnologia a ser utilizada, resistência requerida para a areia de fundição (FERREIRA, 1999). Na etapa de macharia são elaborados os machos, são constituídos por uma mistura sólida de areia, catalisadores e ligantes químicos, que são colocados no interior dos moldes de areia com função de produzir detalhes e cavidades necessários para que após o vazamento e remoção dos machos, deixem a forma desejada na peça fundida. O molde, que tem o formato negativo da peça a ser fundida, é elaborado em duas partes no interior de uma caixa com uma parte superior (caixa superior) e uma inferior (caixa inferior), para facilitar sua moldagem. A areia de moldagem é uma mistura de areia e aditivos que serão descritos mais adiante. No processo de moldagem, a areia de moldagem é compactada em torno do molde, utilizando as caixas de moldagem. Após a remoção do molde, os machos são colocados em posição, fecha-se a caixa de moldagem e derramar-se o metal fundido na cavidade da caixa de moldagem. Esta é mantida fechada até a solidificação do metal vazado (CHEGATTI, 2016).

Após o vazamento, solidificação e resfriamento, segue-se a etapa de desmoldagem por vibração. Nesta etapa são removidas a areia de moldagem e os machos queimados. No acabamento se dá as a remoção de canais de vazamento, jateamento e esmerilhamento das rebarbas, podendo, posteriormente, ser encaminhada às etapas de tratamento de superfície e pintura, caso estejam incluídas no processo (CHEGATTI, 2016).

A areia utilizada na fundição é uma mistura de vários elementos que se combinam, conferindo à mistura características de perfeita trabalhabilidade para a moldagem (PEREIRA, 2005). Algumas das propriedades que a areia adquire devido à mistura dos constituintes são: maleabilidade, compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos como à compressão e à tração, expansividade volumétrica, permeabilidade e perfeita desmoldagem (BONIN, 1995). As areias utilizadas na fundição podem ser divididas em dois grupos principais: as areias a verde e as areias ligadas quimicamente.

A areia a verde possui como constituintes a areia em si, pó de carvão, bentonita e água. A areia é constituída principalmente de sílica (óxido de silício - SiO_2), sendo a areia de quartzo ou sílica a mais utilizada nos processos de fundição. Também podem ser empregadas a cromita (FeCr_2O_5 ou FeCr_2O_4), zirconita (ZrSiO_4) e de olivina ($\text{Mg, Fe}_2(\text{SiO}_4)$). A escolha do tipo de areia e o consumo depende do tipo

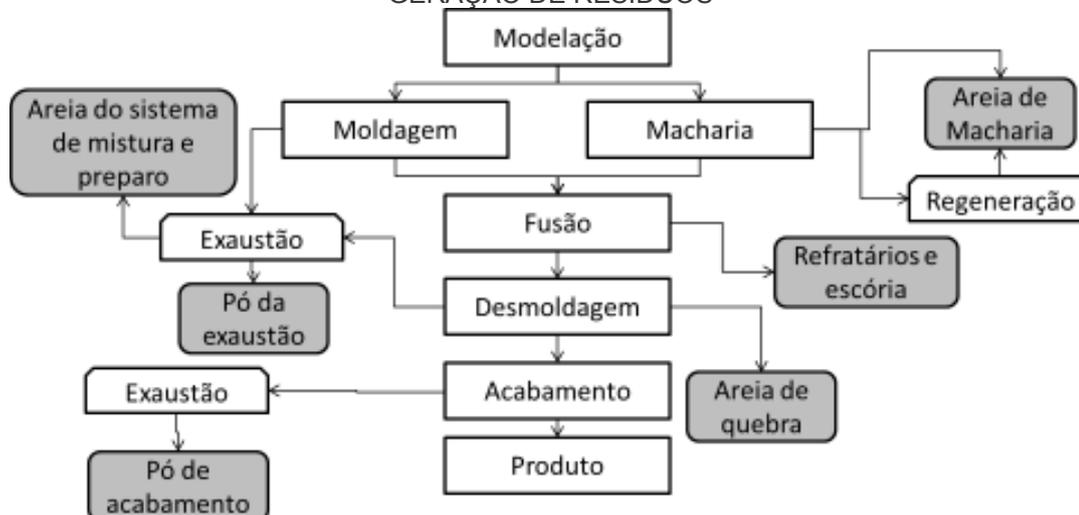
de peça a ser fundida e é caracterizada como agregado fino e puro, apresentando granulometrias entre 0,05 mm a 2,0 mm de diâmetro (CHEGATTI, 2016). De uma maneira geral, o pó de carvão é constituído por material volátil, carbono fixo, cinzas, água e enxofre. A bentonita é classificada como um silicato de alumina hidratado, sendo formada por lamelas e classificada pela espessura destas. A água possui, como função principal, aumentar a umidade da mistura, melhorando a propriedade coesiva entre os constituintes (PEREIRA, 2005).

As areias ligadas quimicamente são denominadas pois, em sua constituição, há uma grande variedade de matérias-primas de moldagem e macharia que utilizam sistemas ligantes orgânicos, bem como: resinas furânicas, fenólicas e uretânicas; ligantes inorgânicos, como o silicato de sódio e o cimento Portland, e resinas mistas, como as resinas fenólicas alcalinas, normalmente empregadas na maioria das fundições para fabricação dos machos, mas também os moldes (ABIFA, 1999). Os ligantes têm função de conferir aos moldes de areia coesão, plasticidade e resistência para a perfeita fabricação da peça fundida.

2.1.1 Resíduos de areia descartada de fundição no mundo

Tão importante quanto o processo de obtenção da peça fundida acabada, é verificar as entradas e saídas do processo, isto é, avaliar os insumos inerentes ao processo de fundição para a obtenção do produto final. O fluxograma de entradas e saídas do processo de fundição está apresentado na FIGURA 2.3, sendo os resíduos evidenciados pelas caixas destacadas.

FIGURA 2.3 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM PONTOS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS



FONTE: Chegatti (2016).

A indústria de fundição utiliza areia de sílica de alta qualidade, com tamanho especificado para o processo de moldagem e fundição. Devido suas particularidades, grande parte das indústrias fundidoras recicla e reutiliza com sucesso a areia de fundição. No entanto, quando já não pode ser reutilizada na fundição, visando à qualidade das peças finais, a areia é removida da indústria e então denominada Areia Descartada de Fundição (ADF) (SINGH e SIDDIQUE, 2012).

Apesar de recicladoras de sucatas metálicas, a indústria de fundição, tem na ADF seu principal problema de gestão de resíduo, já que a geração desta constitui, aproximadamente, 85% do total de resíduos gerados na fundição (CHEGATTI, 2016).

A geração de ADF representa um resíduo sólido industrial produzido em grande volume no mundo (CHEGATTI, 2016). No Brasil, a maioria desta é encaminhada a aterros industriais, isso quando não é disposta inapropriadamente sem autorização (ADEGAS, 2007). A gestão de resíduos é um problema muito complexo e, no futuro próximo, uma tarefa importante será aumentar a reciclagem e o aproveitamento econômico, enquanto se reduz o armazenamento de resíduos em aterros (SMARZEWSKI e BARNAT-HUNEK, 2016).

A ADF, em geral, possui coloração preta e contém grande montante de grãos de baixa granulometria. As propriedades físicas e químicas da ADF são dependentes do tipo de processo do qual esta é originada na fundição: aglomerante, processo de cura da areia, qual o metal ou liga fundido, processo de fundição (temperatura), processo de acabamento da peça, entre outros (SINGH e SIDDIQUE, 2012).

Na TABELA 2.1 é apresentada a composição química típicas das ADFs caracterizada por Winkler e Bol'shakov (2000) em seu estudo. Percebe-se a maior porcentagem de SiO_2 , seguida dos Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DE ADFS, OBTIDA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Constituinte	Porcentagem (%)
SiO ₂	87,91
Al ₂ O ₃	4,70
Fe ₂ O ₃	0,94
CaO	0,14
MgO	0,30
SO ₃	0,09
Na ₂ O	0,19
K ₂ O	0,25
TiO ₂	0,15
P ₂ O ₅	0,00
Mn ₂ O ₃	0,02
SrO	0,03
Perda ao fogo	5,15

FONTE: Winkler & Bol'Shakov (2000).

A utilização da ADF como matéria prima para a construção civil e outras aplicações é essencial para a redução dos problemas ambientais gerados até então (SARASWATI *et al.*, 2013).

Estudos têm sido realizados no Brasil, na Índia, nos Estados Unidos, entre outros países, com o intuito de reaproveitamento da ADF em variadas formas. Como substituinte da areia natural na construção civil desde na pavimentação (CARNIN *et al.*, 2010) até em concreto com funções estruturais (KACHA, NAKUM e BHOGAYATA, 2014), ingrediente em misturas de solo superficial ou recuperação de zonas de enraizamento para aplicações de relva (LINDSAY e LOGAN, 2005), na base de barreiras hidráulicas, atestando posterior potabilidade da água represada (ABICHOU, BENSON e EDIL, 2000), dentre outros usos.

Nos Estados Unidos, as indústrias de fundição estimam a produção de, aproximadamente, 100 milhões de toneladas de areia anualmente e que, dessas, apenas de 6 a 10 milhões estão disponíveis para a reciclagem (SIDDIQUE SCHUTTER e NOUMOWE, 2009) A maior parte é disposta em aterros de resíduos

não perigosos, em aterros municipais e privados, desses apenas 2% são considerados resíduos perigosos (DUNGAN, KUKIER e LEE, 2006). Na China, estima-se que sejam descartadas mais de 30 milhões de toneladas anuais (SAWAI *et al.*, 2016).

De acordo com o Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de abril de 2006, sobre as transferências de resíduos, os resíduos de areia de fundição não são mais classificados como perigosos. Assim, o material residual pode ser reciclado e reutilizado em outras indústrias (SMARZEWSKI e BARNAT-HUNEK, 2016).

No Brasil, os Estados de São Paulo e Santa Catarina permitem o uso de ADF em aplicações de reciclagem externa, como na fabricação de asfalto e na construção de artefatos de concreto que não tenham funções estruturais, como tijolos e lajotas para calçadas. Apesar da liberação, o uso é pequeno se comparado com o volume de resíduos produzidos pelas fundições (SANTOS *et al.*, 2016).

Em agosto de 2007, a diretoria plena da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) aprovou o documento intitulado “Procedimentos para Gerenciamento de Areia de Fundição” que visou apresentar os procedimentos a serem adotados pela CETESB e a serem exigidos das empresas geradoras do resíduo sólido areia de fundição, assim como, das empresas destinatárias destes resíduos. O documento orienta os métodos para a adequação de operações, transporte e armazenamento de areia de fundição pelas empresas geradoras e receptoras, bem como a caracterização a ser realizada pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) e, para o caso de reuso em artefatos de concreto, devem ser apresentados os resultados de testes de toxicidade aguda com a bactéria luminiscente *Vibrio fischeri*, com metodologia anexa ao documento.

Em Santa Catarina, com a resolução CONSEMA N° 26, de 06 de setembro de 2013, foram estabelecidas as diretrizes para autorização ambiental de processos decorrentes da utilização da ADF como insumo ou matéria prima em outros processos industriais e obras. Para tanto, a resolução pede que seja realizada a classificação da ADF conforme NBR 10.004 (ABNT, 2004) podendo ser utilizada quando for classificada como Classe II – A – Não inerte, sendo necessário o controle semestral dos parâmetros dos extratos solubilizados e lixiviados. Tal resolução solicita ainda que seja realizado o teste de ecotoxicidade organismo *Vibrio fischeri* (conforme metodologia anexa à resolução) ou outros organismos normatizados para

testes de ecotoxicidade, desde que sejam atendidas as normas técnicas e observadas as condições mínimas de preparo da amostra para realização dos ensaios.

Em Minas Gerais, tramita na Assembléia Legislativa o Projeto de Lei nº 3432 2016 que dispõe sobre a utilização de areia descartada de fundição na construção e conservação das estradas estaduais e na cobertura de aterros sanitários licenciados. Aguardando parecer da Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável e com projetos similares em discussão desde 2009, o projeto de lei em questão requer em seu Art. 1º a obrigatoriedade da avaliação por meio de estudos a possibilidade do uso de ADF em obras públicas de conservação e construção de estradas estaduais e na manutenção de aterros sanitários como componente da mistura asfáltica e para a cobertura diária dos aterros sanitários. Não havendo a possibilidade do aproveitamento requer, ainda, que seja apresentada justificativa técnica ou econômica do não uso. A Fundação Estadual do Meio Ambiente do estado mineiro, em 2014, já publicou a Deliberação Normativa FEAM MG nº 192 que dispõe sobre o uso de ADF de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto não estrutural.

Nos Estados de Paraná e Rio Grande do Sul são o requerimento de licenciamento ou normativas locais, como a Diretriz Técnica FEPAM RS001/2010, que norteiam a autorização de uso de ADF em outras aplicações.

2.1.2 Tópicos de legislação ambiental nacional e estadual para os resíduos sólidos

No Brasil, a partir dos anos 1980, a legislação brasileira começou sua consolidação que, até então, se baseava na regulamentação da ocupação do solo e o atendimento da exploração ambiental (FREIRIA, 2015). A partir disto, se estabeleceu os princípios a serem seguidos para disciplinar as relações do homem com o meio ambiente, se preocupando com a preservação dos recursos naturais e o combate à poluição em busca do desenvolvimento sustentável (TOLEDO, 2006).

A primeira evidência disso foi o Decreto de Lei N° 1.413, de 14 de agosto de 1975, que dispôs sobre o controle da poluição do meio ambiente provocado por atividades industriais, estabelecendo em seu Artigo 1º que “as indústrias instaladas ou a se instalarem em território nacional são obrigadas a promover as medidas necessárias a prevenir ou corrigir os inconvenientes e prejuízos da poluição e da

contaminação do meio ambiente”. O mesmo decreto ainda definia que “os Estados e Municípios poderão estabelecer, no limite das respectivas competências, condições para o funcionamento de empresas de acordo com as medidas previstas no parágrafo único do artigo 1º” (BRASIL, 1975).

Com a Lei N° 6.938, de 31 de agosto de 1981, foi estabelecida a Política Nacional do Meio Ambiente, que tem por objetivo a “preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento sócio-econômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana”. Para que essa gestão fosse adequadamente atendida, criaram-se estruturas administrativas ambientais federativas. Constituiu-se o Sistema Nacional do Meio Ambiente, o SISNAMA, e o Conselho Nacional do Meio Ambiente, o CONAMA, como seu órgão superior. (BRASIL, 1981; FREIRIA, 2015). O CONAMA foi responsável pela criação de uma importante ferramenta obrigatória de planejamento ambiental para atividades humanas: os Estudos de Impacto Ambiental (EIA), por meio da Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente 001, de 23 de janeiro de 1986.

Com a Constituição Federal de 5 de outubro de 1988, o Art. 225 dispõe sobre os direitos de todos os cidadãos quanto o meio ambiente. “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (BRASIL, 1988).

Segundo Freiria (2015), a Constituição de 1988 também influenciou na admissão de regulamentações ambientais por parte das constituições estaduais e nas leis municipais posteriormente elaboradas, estabelecendo a hierarquia das legislações para o meio ambiente.

A Lei N° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, a chamada Lei dos Crimes Ambientais, estabeleceu sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. O processo administrativo federal para apuração destas infrações foi estabelecido pelo Decreto N° 6.514, de 22 de julho de 2008.

Pela Lei Federal N° 10.165 de 27 de novembro de 2000, as indústrias tiveram que ser registradas junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) pelo Cadastro de Atividades Potencialmente Poluidoras ou como utilizadoras de Recursos Naturais. Além de alterar a Lei N°

6937, de 31 de agosto de 1981, instituiu a Taxa de Controle e Fiscalização Ambiental (TCFA), conferindo ao IBAMA o controle e fiscalização das atividades cadastradas. Ainda, com a presente lei, os sujeitos utilizadores dos recursos naturais ou potencialmente poluidores devem fornecer até o dia 31 de março de cada ano um relatório das atividades desempenhadas no ano anterior, colaborando com os procedimentos de controle e fiscalização.

Com a instituição do Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais pela Resolução CONAMA Nº 313, de 29 de outubro de 2002, foi possível definir informações sobre a geração, características, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final dos resíduos sólidos gerados pelo segmento industrial do país.

No Estado do Paraná a Legislação Ambiental quanto aos resíduos sólidos seguem as diretrizes impostas pela Lei Estadual 12.493, de 5 de fevereiro de 1999 que “estabelece os princípios, procedimentos, normas e critérios referentes à geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos no Estado do Paraná, o qual visava o controle da poluição, da contaminação e a minimização de seus impactos ambientais”. Tal lei teve seu regulamento aprovado pelo Decreto Estadual 6.674, de 2002.

Em dezembro de 2007, foi aprovada a Portaria IAP nº 224 que estabeleceu os critérios para a exigência e emissão de Autorizações Ambientais para as Atividades de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, definidas como armazenamento, tratamento, coprocessamento e disposição final dos resíduos. Em 26 de outubro de 2016 a Portaria IAP nº 202 complementa a Portaria IAP de 2007, revogando as disposições contrárias e adicionando novos critérios para exigência e emissão de Autorizações Ambientais.

Em agosto de 2010 foi sancionada a Lei Nº 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, alterando a Lei no 9.605, de 1998. O Artigo 9º da presente lei estabelece que para a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos “deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010).

2.1.3 Normas técnicas sobre a ADF

Com o intuito de normalizar o campo da fundição de ferro, aço, não ferrosos, insumos, matérias-primas e resíduos, foi criado em 2007 o Comitê Brasileiro de Fundição, (ABNT/CB-59), responsável pela elaboração e revisão das normas técnicas referentes à cadeia de fundição. O Comitê é composto pelos subcomitês de Resíduos de Fundição (59:001), Fundição de Aço (59:002), Fundição de Ferro (59:003), Fundição de Não Ferrosos (59:004) e Matérias-Primas (59:005).

Dentre outras normas técnicas elaboradas pelos subcomitês da Comissão Brasileira de Fundição, estão as implementadas pela Comissão de Estudos de Resíduos de Fundição, CB-59:001.01, que deu origem a uma norma ABNT, a NBR 15.702 (ABNT, 2009), que apresenta as diretrizes para a aplicação de ADF em asfalto e aterro sanitário. Já em 2011, foi elaborada, pela mesma comissão, a norma NBR 15.984 (ABNT, 2011) que estabeleceu as diretrizes para o projeto, construção e operação de áreas para receber, processar, armazenar e destinar as ADFs para fins de reuso, reciclagem ou disposição, as Centrais de Processamento, Armazenamento, e Disposição (CPADs) de ADFs.

De acordo com a NBR 15.984 (ABNT, 2011), as ADFs utilizadas nas CPADs devem ser classificadas de acordo com o conjunto de normas ABNT NBR para a Classificação e Resíduos Sólidos. Esta institui os parâmetros de classificação de Resíduos Sólidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), baseando-se nos ensaios de Lixiviação e de Solubilização normatizados pela NBR 10.005 (ABNT, 2004) e NBR 10.006 (ABNT, 2004), respectivamente. Pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) os resíduos sólidos são classificados como perigosos (Classe I) ou não perigosos (Classe II), sendo este último ainda subdividido em não inerte (Classe II – A) e inerte (Classe II – B).

A classificação dos resíduos sólidos, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) está definida no QUADRO 2.2.

QUADRO 2.2 - CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS CONFORME NBR 10.004/2004

Resíduo Classe I – Perigosos

Resíduos que apresentem periculosidade, isto é, que em função das características físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem representar risco à saúde pública, causando a mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, ou ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Resíduo Classe II A – Não Inerte

Resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes classificados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004). Os resíduos definidos como resíduos classe II A – não inertes pela mesma norma, podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade.

Resíduo Classe II B – Inerte

Resíduos que “quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10.007 (2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10.006 (2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G”. (NBR 10.004, 2004, p. 5).

FONTE: ABNT (2004).

Para o efeito informativo da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), as ADFs constam no anexo H – Codificação de alguns resíduos classificados como não perigosos, tendo como código A016, em sua maioria como Classe II-A. São consideradas, então, resíduos não perigosos desde que não estejam contaminados por substâncias presentes nos anexos C, D ou E, da mesma norma e que apresentem características de periculosidade.

Segundo estudo desenvolvido por Alves *et al.* (2014) avaliou os extratos lixiviados de 10 tipos de ADFs aglomeradas tanto com constituintes orgânicos quanto inorgânicos. A média dos valores obtidos é apresentada na TABELA 2.2.

TABELA 2.2 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DO LIXIVIADO EM ADFS

Parâmetro	Concentração média no Lixiviado (ppm)	Limite máximo no extrato (ppm) NBR 10.004:2004 Anexo H
Arsênio	< 0,01	1,000
Bário	1,4	70,00
Cádmio	< 0,001	0,5000
Chumbo	0,05	1,000
Cromo total	0,21	5,000
Fluoreto	0,32	150,0
Mercúrio	< 0,00005	0,1000
Prata	0,01	5,000
Selênio	0,01	1,000

FONTE: Alves *et al.* (2014).

No extrato lixiviado, as concentrações médias não atingiram os máximos estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), sendo, portanto, caracterizado como Resíduo Não Perigoso, Classe II, pelo fato de não apresentar característica de toxicidade (ALVES *et al.* 2014).

No entanto, em relação ao extrato solubilizado (TABELA 2.3), as concentrações médias foram superiores ao limite máximo permitido para os elementos de Alumínio, Ferro e Manganês, presentes nos aglomerantes, como na areia de fundição a verde aglomerada com bentonita, e com concentração proporcional ao aumento do percentual de argila presentes nas ADFs (CHEGATTI, 2016).

TABELA 2.3 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DO SOLUBILIZADO EM ADFS

Parâmetro	Concentração média no Solubilizado (ppm)	Limite máximo no extrato (ppm) NBR 10.004:2004 Anexo G
Alumínio	44,63	0,200
Arsênio	< 0,01	0,010
Bário	< 0,2	0,700
Cádmio	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	0,010
Cianeto	< 0,07	0,070
Cloreto	34,70	250,0
Cobre	0,01	2,0
Cromo total	< 0,03	0,050
Fenóis Totais	< 0,002 / 0,6*	0,010
Ferro	16,40	0,300
Fluoreto	1,04	1,500
Manganês	0,21	0,100
Merúrio	< 0,001	0,001
Prata	< 0,05	0,050
Selênio	< 0,01	0,010
Sódio	37,28	200,0
Sulfato	120,72	250,0
Zinco	0,25	5,0

* Média com ADF Fenólica

FONTE: Chegatti (2016).

O fato das ADFs geralmente apresentarem concentrações acima dos máximos permitidos para o extrato solubilizado, a caracteriza, na maioria dos estudos de caso em que é aplicada, como Classe A - Não inerte segundo NBR 10.004 (ABNT, 2004).

2.1.4 Alternativas de reuso da ADF no Brasil e no mundo

Dentre as alternativas de reuso da ADF, são definidas as reciclagens interna e externa, sendo que tal denominação está relacionada ao local de tratamento do resíduo de descarte. Sendo assim, como reciclagem interna, são entendidos os processos nos quais há a reciclagem da ADF dentro da própria empresa geradora. São eles: a recuperação e a regeneração da ADF.

O processo de recuperação da areia consiste na reutilização da mesma, no próprio processo de fundição. Para isso, faz-se necessário apenas a aplicação de operações de desagregação dos grumos de areia formados durante a fundição e remoção dos finos e dos materiais metálicos remanescentes (PEIXOTO e GUESSER, 2003).

Já a regeneração de areia de fundição é o processo em que as areias utilizadas na produção de moldes e machos se tornam reaplicáveis nos mesmos processos que foram originadas, substituindo total ou parcialmente a areia nova padrão, sem reduzir as qualidades dos materiais produzidos. Ele se baseia na limpeza da superfície de seus grãos, retirando as substâncias aderidas e na remoção das partículas provenientes dessa limpeza (SCHEUNEMANN, 2005). Nesse processo, são utilizados tratamentos adicionais, podendo ser físico, químico ou térmico, possibilitando a reutilização sem perdas expressivas das propriedades originais na aplicação desejada (PEIXOTO e GUESSER, 2003). Porém, o reciclo das areias de fundição pode requerer equipamentos sofisticados para que possa ser restaurada, onerando pequenas e médias empresas que não podem arcar com os elevados custos da recuperação (CHEGATTI, 2016). Adicionalmente, a resina utilizada na areia de fundição como aglomerante pode acabar dificultando o processo de recuperação e, portanto, sua reutilização, gerando uma grande quantidade de descarte a ser encaminhada a aterros industriais que acabam onerando o custo de produção de fundidos (SCHEUNEMANN, 2005).

Nas alternativas de reciclagem externas à empresa geradora da ADF, muito é relatado na literatura, sobre a tentativa de empregar material residual na construção civil. Ela pode ser utilizada como substituinte da areia natural em aplicações que vão desde a fabricação de artefatos de concreto, como blocos, e pavimentação, até artefatos cerâmicos, como telhas e tijolos (CHEGATTI, 2004; CARNIN *et. al.*, 2013).

Pinto (2013) estudou a influência do uso da ADF no concreto, moldando corpos de prova com porcentagens de substituição de 0%, 10% e 20% do volume de areia natural pela ADF, utilizando cimento CP V. Pela análise dos resultados de ensaios para o concreto, tanto no estado fresco como endurecido, verificou-se que o uso da ADF como agregado miúdo, substituindo parte da areia natural foi tecnicamente viável, tanto para 10% quanto 20%, não apresentando diferença significativa entre os resultados do concreto de controle e os fabricados com ADF no ensaio de resistência à compressão axial, podendo ser aplicada para tal fim.

De estudos de substituição de areia natural por ADF, foi verificado por Siddique, Schutter e Noumowe (2009) o aumento de resistência à compressão (8 a 19%), módulo de elasticidade (5 a 12%), resistência à tração (6,5 a 14,5%), resistência à flexão (7 a 12%) com o aumento de substituição de ADF, maximizando em 30% de substituição, possibilitando convenientemente a troca (GURUMOORTHY e ARUNCHALAM, 2016).

Quanto à permeabilidade nas peças de concreto, foi observado o aumento da absorção de água pelo concreto com o aumento de substituição de areia natural por ADF Verde (GUNEY *et al.*, 2010), reduzindo a resistência mecânica da peça (KHATIB, HERKI e KENAI, 2013). Seguindo esta redução, Basar e Aksoy (2012) utilizaram a ADF Verde em cinco proporções de substituição de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% a areia natural e verificaram que a adição de ADF à pasta reduz a resistência à compressão e a densidade e aumenta a absorção de água das misturas de concreto. A partir de outros trabalhos, os autores justificam tal comportamento à grande área superficial das finas partículas de ADF reduzindo o gel de pasta cimentícia e, pela presença de aglomerante nesta superfície, impede a formação de estruturas entre a pasta e os agregados (NAIK *et al.*, 2003; BASAR e AKSOY, 2012).

O efeito do fator a/c (água/cimento) nas misturas cimentícias contendo ADF e cinzas foi avaliado por Aggarwal e Siddique (2014). Com o aumento da ADF e cinzas substituídas na mistura, mais água foi necessária para a homogeneização da massa cimentícia, provocando o aumento do fator a/c. Para as substituições iniciais de 10%, 20% e 30%, o aumento no teor de água foi constante e depois para 40% e 50%, novamente permaneceu constante, mas quase o dobro do valor das reposições iniciais. Já a mistura com 60% de substituição não foi recomendada pelo fato do teor de água desta mistura ser alta, o que também refletiu sobre outras propriedades, como resistência à compressão, reduzindo-a.

Mastella *et al.* (2014) avaliaram as propriedades mecânicas e toxicológicas de concretos fabricados em três proporções de 0%, 25% e 50% de ADF Verde e diferentes relações de cimento e agregados (proporções de 1:3; 1:4,3 e 1:6). Segundo os autores, a resistência de 35 MPa foi atingida aos 28 dias para 25% de substituição. Nos testes de toxicidade foi constatada sensibilidade dos organismos aos constituintes do próprio concreto e não da ADF. Isso porque, no extrato lixiviado com 0% de substituição de ADF Verde foram encontrados 60% de organismos

mortos e para o extrato de ADF, apenas 5% de organismos mortos, sendo assim, segundo os autores, é possível a utilização de ADF Verde em blocos.

O emprego de ADF como possível constituinte da massa asfáltica, empregada como substituto para os agregados miúdos em misturas de pavimento asfáltico também foi estudado. A ADF é considerada, por trabalhos como o de Bonet (2003), como uma matéria-prima possivelmente satisfatória para a pavimentação asfáltica, pois atende as especificações de dimensionamento estruturais e legislação ambiental (CHEGATTI, 2004).

A partir desses estudos, e das discussões realizadas pela CB-059, foi elaborada, em 2009, a NBR 15.702 (ABNT, 2009) que dispõe sobre as Diretrizes para aplicação de ADF em asfalto e em aterro sanitário.

Estudos e práticas mostram que as ADFs são reutilizáveis em múltiplas atividades como na construção civil e, comparando os resultados lixiviados obtidos de ADF com extratos lixiviados de solo natural, foram observados resultados semelhantes, evidenciando o baixo risco de impacto negativo efetivo ao meio ambiente (CHEGATTI, 2016).

O uso de ADF em aterros sanitários foi bastante estudado por Gomes, Moraes e Boff (2007), o qual apresentou uma menor permeabilidade de lixiviado que os outros resíduos estudados pelos autores, conferindo à areia de fundição características adequadas para ser empregada em camadas de cobertura final. Este uso alternativo da ADF já é regulamentado pela NBR 15.702 (ABNT, 2009), citada anteriormente.

Outra aplicação para os resíduos de ADFs é a sua utilização como material de base e sub-base para rodovias de baixo volume de tráfego e vias urbanas. O estudo desenvolvido por Klinsky e Fabbri (2009) revela que solos argilosos com 60% de areia de fundição adicionada poderiam ser empregados como material de sub-base e base para pavimentos de tráfego leve, com baixo risco de poluição o meio ambiente.

Carnin *et al.* (2013), no estudo de caso no Bairro de Vila Nova, em Joinville-SC, além da reciclagem da ADF Verde como assentamento e recobrimento de tubulações, também se atendeu a grande demanda de obras de esgoto sanitário na região. Com este trabalho, foi possível avaliar as alterações na qualidade das análises de monitoramento ambiental, as quais não foram detectadas evidências de

alterações na qualidade da água subterrânea decorrentes da lixiviação de possíveis contaminantes a partir da ADF.

Miguel *et al.* (2012) apresentaram as médias das concentrações de metais totais extraídas de amostras de ADF com aglomerantes de areia Verde, Fenólica, Uretânica, Fenol-formoldeído, aglomerantes naturais, misturas de aglomerantes e de solos dos Estados Unidos e da Argentina. Quando comparadas às concentrações de solo nativo as concentrações de metais totais nas ADFs foram semelhantes, porém abaixo dos valores nos solos, devendo, segundo os autores, ser classificada como resíduo não perigoso pela Secretaria Argentina de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável.

Em resumo, a partir de revisão dos trabalhos científicos por Alves (2012), as ADFs são aplicadas em três principais áreas:

- (i) produtos fabricados;
- (ii) aplicações geotécnicas,
- (iii) aplicações diretas no solo para fins agrícolas.

Além disso, Alves (2012) verificou as aplicações e porcentagens de aplicação das ADFs estudadas na literatura em cada uma das práticas da TABELA 2.4.

TABELA 2.4 - USOS E PRÁTICAS PARA APLICAÇÃO DE ADF

Usos e práticas	Porcentagem em massa de ADF aplicada
Artefatos de concreto	10 a 45%
Produção de cimento	> 13%
Artefatos de cerâmica	15 a 30%
Reaproveitamento de termoplásticos	10%
Vitrificação	20 a 50%
Produtos de isolamento térmico e acústico	Não especificado
Camada de cobertura de aterros/ Barreiras hidráulicas	12 a 90%
Camadas para pavimentação asfáltica	8 e 10%
Aterros para a construção de estradas	60%
Material de baixa resistência controlada	85%
Solos agrícolas fabricados	30%
Práticas de remediação	Não especificado

FONTE: Alves (2012), modificada pela autora.

Na grande maioria dos estudos, a ADF reutilizada em outros processos de produção é classificada pela ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004) como sendo Resíduo Classe II A – Não Inerte (CHEGATTI, 2016; MASTELLA *et al.*, 2014; CARNIN *et al.*, 2010), pelo fato dos valores obtidos do ensaio da ABNT NBR 10.006 (ABNT, 2004) para solubilizados serem superiores aos limites máximos fixados por norma no anexo G de classificação dos resíduos sólidos, podendo ser aplicados em reciclagem externa, segunda legislações vigentes.

2.1.5 Reuso da ADF na pavimentação de concreto

O uso de ADF em pavimentação torna-se importante pelo fato de não ter função estrutural, facilitando a aplicabilidade e liberação de licenças pelos órgãos fiscalizadores. No entanto, os requisitos técnicos de durabilidade e resistência à compressão são de extrema importância mesmo para estes casos. Watanabe (2004) avaliou a influência da adição de ADF Verde como substituto da areia natural na fabricação dos pavers em teores de 0, 25, 50, 75 e 100%, fabricados pelo método de vibração e vibrocompressão. Verificou a tendência de redução da resistência à compressão das peças, conforme se aumentava o teor de ADF nos corpos de prova fabricados por vibração, de 15,5 MPa no traço padrão para 3,0 MPa com 100% de substituição. Para os produzidos por vibrocompressão, foi constatado o aumento da resistência à compressão de 25,4 MPa para o traço padrão com areia natural e 32,2 MPa com a adição de 25% de ADF. Em complemento aos ensaios de resistência à compressão, Watanabe (2004) também investigou a potencialidade poluidora dos pavimentos fabricados com 25% de ADF em comparação com o traço padrão, realizado nos ensaios de lixiviação e solubilização conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004). Tanto na amostra contendo ADF como no traço padrão, foi verificada a presença de concentração acima do valor máximo permitido do elemento Alumínio, sendo descartada, pelo autor, a capacidade poluidora do pavimento fabricado com ADF.

A comparação das granulometrias dos agregados finos pelo estudo de Watanabe (2004) foi verificada que ADF Verde utilizada na fabricação dos pavimentos quando confrontada à granulometria da areia natural substituída era mais fina constituída por grãos menores, característica que o autor atribuiu como a responsável pelo aumento da resistência à compressão dos corpos de prova de ADF

Verde em relação com os de areia natural, quando fabricados por vibrocompressão, devido ao melhor preenchimento de vazios nas peças de concreto, obtendo o pavimento mais compactado, com menor porosidade.

Em seu estudo, Carnin *et al.* (2010) caracterizaram a ADF Verde como Resíduo Classe II – A – Não Inerte e aplicaram na fabricação de pavimentos de concreto com cimento CP V ARI. Os resultados de resistência à compressão característica do lote fabricado foi de 35,9 MPa com idade de 45 dias de cura, sendo que o requisito de norma NBR 9781/2013 é igual ou superior a 35 MPa, aos 28 dias. Foram também realizados os ensaios de absorção de água, visando obter informações quanto à compactação das peças e sua permeabilidade. A absorção de água média obtida por Carnin *et al.* (2010) foi de 6,6% quando o máximo especificado pela norma NBR 9781/2013 é de 6,0%, estando, portanto, acima do requisito normativo.

Como complemento à pesquisa, foi avaliada a possibilidade de expansão da mistura cimentícia em ensaio de ambiente agressivo, normatizado pela ASTM C 151, que submete a amostra à pressão de 295 psi e 220 °C, em autoclave, por cinco horas. Os resultados do ensaio foram inferiores ao limite máximo permitido de 0,8%, sendo relatado, pelos autores, a ausência de lascamento ou fissurações nas peças ensaiadas.

A título de verificação da durabilidade das amostras fabricadas, as mesmas foram submetidas a ensaio de molhagem e secagem, utilizado para a verificação da durabilidade em solo-cimento, normatizado pela NBR 13.554 (ABNT, 1996). Segundo os autores, “as peças ensaiadas não apresentaram desgastes significativos e visualmente não apresentaram fissuras e nem partículas soltas”, atestando a durabilidade das peças e a possibilidade do uso da ADF como substituinte da areia natural em pavimentos intertravados.

A aplicação da ADF em pavimentação de concreto como em outros tipos de reaproveitamento ainda apresenta muitos desafios. Por isso, a análise integral dos requisitos técnicos normatizados e o potencial poluidor das peças de pavimento fabricados com ADF são justificados. Adicionalmente a verificação das peças contendo ADFs quanto à suscetibilidade a reação álcali agregado também é necessária, prezando por um produto estável e resistente às diferentes aplicações.

2.2 CONCRETO E AGREGADOS

2.2.1 Concreto

O concreto é hoje o segundo material mais consumido no mundo. Projeções otimistas presumem que o este possa ocupar o primeiro lugar a partir de 2025, superando a geração de água potável. Cogita-se que a produção brasileira de concreto dosado em central atingirá 72,3 mi m³ em 2017 (ABCP, 2016).

Algumas características do concreto fazem deste o material mais utilizado na engenharia, como a sua excelente resistência à água (quando comparado a outros materiais, como o aço e madeira), custo, aplicável em diferentes estruturas, formas e tamanhos (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

O concreto é um material composto por um meio aglomerante de cimento e água com partículas e fragmentos de material granular, denominados agregados. Os agregados são materiais como areia, pedregulho, pedra britada ou escória de alto forno. Esses materiais são classificados em diferentes granulometrias como agregados graúdos, com dimensões superiores a 4,8 mm, e agregados miúdos, com dimensões de até 4,8 mm (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Além do cimento, da água e dos agregados, que em proporções alteram as características do concreto, em algumas aplicações, são utilizados aditivos e adições no concreto, com função de obter características específicas, com maior resistência, trabalhabilidade e durabilidade (MEDEIROS, 2005).

O concreto pode ser classificado de acordo com a sua resistência à compressão como alta, moderada ou baixa, na idade de 28 dias. É assim classificado, pois, na engenharia, de acordo com a aplicação do mesmo, devem-se atender aos requisitos de carga de compressão que deve resistir. O concreto de resistência moderada é o concreto convencional (CCV), utilizado na maioria das estruturas, enquanto que o de alta resistência (HRC) é empregado principalmente em funções estruturais específicas.

A resistência à compressão é definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper. Mehta e Monteiro (2006) também alertam que a ruptura pode ser identificada pelo surgimento fissuras. No entanto, o concreto, ao contrário da maioria dos materiais estruturais, antes mesmo de ser submetido a tensões externas, já apresenta muitas fissuras. Por este motivo, a resistência é definida pela

tensão máxima que a amostra de concreto suporta. Assim, mesmo sem sinais visíveis de fraturas externas, o corpo de prova é considerado rompido pelo fato de, por fissuras internas, a amostra não suportar carga superior.

Mesmo que, na prática, o concreto não esteja sujeito apenas às forças de compressão e sim a uma combinação entre tensões de compressão, cisalhamento e tração, é universalmente aceito que os valores de resistência à compressão representem como uma característica geral do concreto, devido à fácil realização deste ensaio (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

2.2.2 A hidratação do cimento

Os mecanismos de hidratação do cimento são extremamente complexos e envolvem fenômenos físico-químicos que ocorrem de escalas nanométricas a micrométricas e de segundos a séculos de duração (RAHIMI-AGHDAMA; BAŽANTB; QOMIC, 2017).

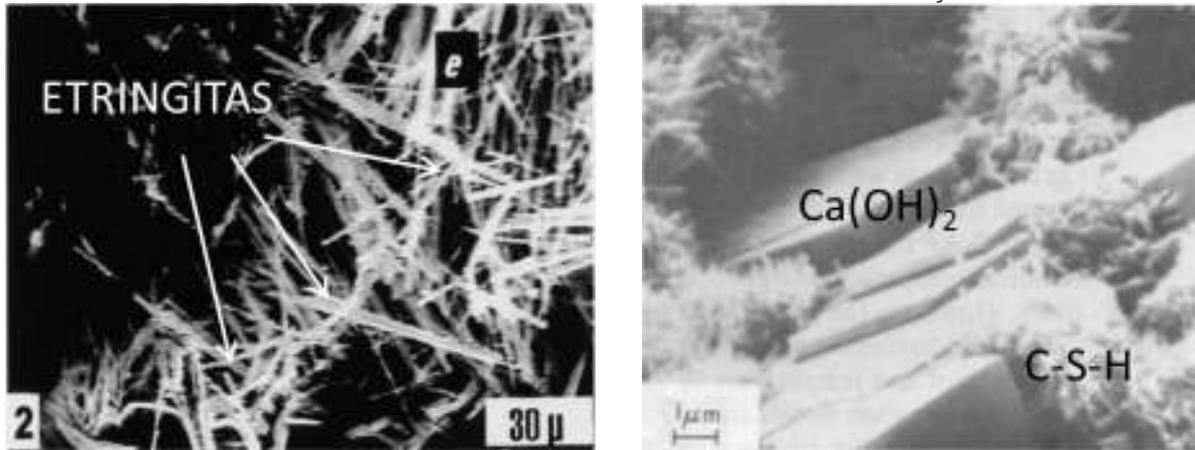
Segundo Bullard *et al.* (2011) durante o processo de hidratação das partículas de cimento em água ocorrem seis etapas distintas: dissolução de íons, difusão, crescimento, nucleação, complexação e adsorção. Segundo os autores, estima-se que estas etapas possam ocorrer em série, paralelo ou em alguma combinação mais complexa, não se especificando quando uma se completa e a outra se inicia.

Com o contato das partículas de cimento com a água, ocorre a dissociação das fases anidras liberando as espécies iônicas no meio líquido. A difusão descreve o transporte na solução dos íons dissociados pelos poros da pasta cimentícia e ao longo da camada de adsorção das superfícies partículas sólidas. Na etapa de crescimento ocorre a incorporação de moléculas nas estruturas cristalina e amorfa dos sólidos (BULLARD *et al.*, 2011).

Os produtos de hidratação do cimento possuem solubilidade baixa em água, precipitando-se (NEVILLE, 2013) por meio de mecanismos chamados de nucleação de forma heterogênea em superfícies sólidas ou homogeneamente em solução (KASCHIEV; ROSMALEN, 2003). Com a precipitação dos primeiros hidratos, formam-se os primeiros cristais aciculares, em formato de agulhas, de sulfoaluminato de cálcio hidratado, chamado etringitas (FIGURA 2.4 (a)). Horas mais tarde, grandes cristais de hidróxido de cálcio (portlandita), em formato prismático, e pequenos cristais fibrilares de silicato de cálcio hidratados (C-S-H) (FIGURA 2.4 (b))

preenchem os vazios entre as partículas de cimento, anteriormente ocupados pela água (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

FIGURA 2.4 - ESTRUTURAS CARACTERÍSTICAS DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO



(a) Etringitas (estruturas aciculares)

Fonte: Batic *et al.* (2000).

(b) C-S-H e Ca(OH)_2

Fonte: Mehta & Monteiro (2008).

A precipitação dos primeiros produtos da fase de hidratação reduz a concentração de íons na solução, favorecendo a dissolução das espécies anidras. Esse processo promove a contínua dissolução e precipitação até a dissolução completa das fases (CASTRO, LIBORIO & PANDOLFELLI, 2011), chegando a fase de complexação, na qual ocorrem reações entre íons dissociados e moléculas complexas precipitadas ou adsorvidas na superfície dos sólidos (STUMM & MORGAN, 1972; MOREL, 1983 *apud* BULLARD *et al.*, 2011). Na adsorção há o acúmulo de íons e precipitados na interface entre a superfície das partículas sólidas e a fase líquida (BULLARD *et al.*, 2011).

O processo de hidratação dos constituintes do cimento se faz essencial para o entendimento da formação e das propriedades dos sistemas cimentícios (SCRIVNER; NONAT, 2011). No QUADRO 2.3 são apresentadas as estruturas formadas na hidratação do cimento e suas principais características.

QUADRO 2.3 - ESTRUTURAS FORMADAS NA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO, SUAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

Estruturas	Características e propriedades
C-S-H	Representa de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta cimentícia completamente hidratada. Não é um composto bem definido, sua morfologia varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. A resistência mecânica do material cimentício é principalmente atribuída às forças de Van der Waals presentes nessa fase.
Ca(OH)₂ (Portlandita)	Constituem de 20 a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Sua morfologia varia de cristais grandes, em formato de prismas hexagonais até placas, geometricamente bastante definidas. Isso ocorre devido ao espaço disponível, temperatura no processo de hidratação e impurezas presentes. Em comparação à fase C-S-H, possui menor contribuição à resistência devido às forças de Van der Waals limitada, devido à menor área específica contribuinte.
Sulfoaluminatos de Cálcio (Etringitas)	Ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida. A etringita pode tornar-se instável e decompor-se para formar o monossulfato hidratado, mais estável, mas com baixa resistência mecânica e deixando o concreto vulnerável a ataque por sulfatos.

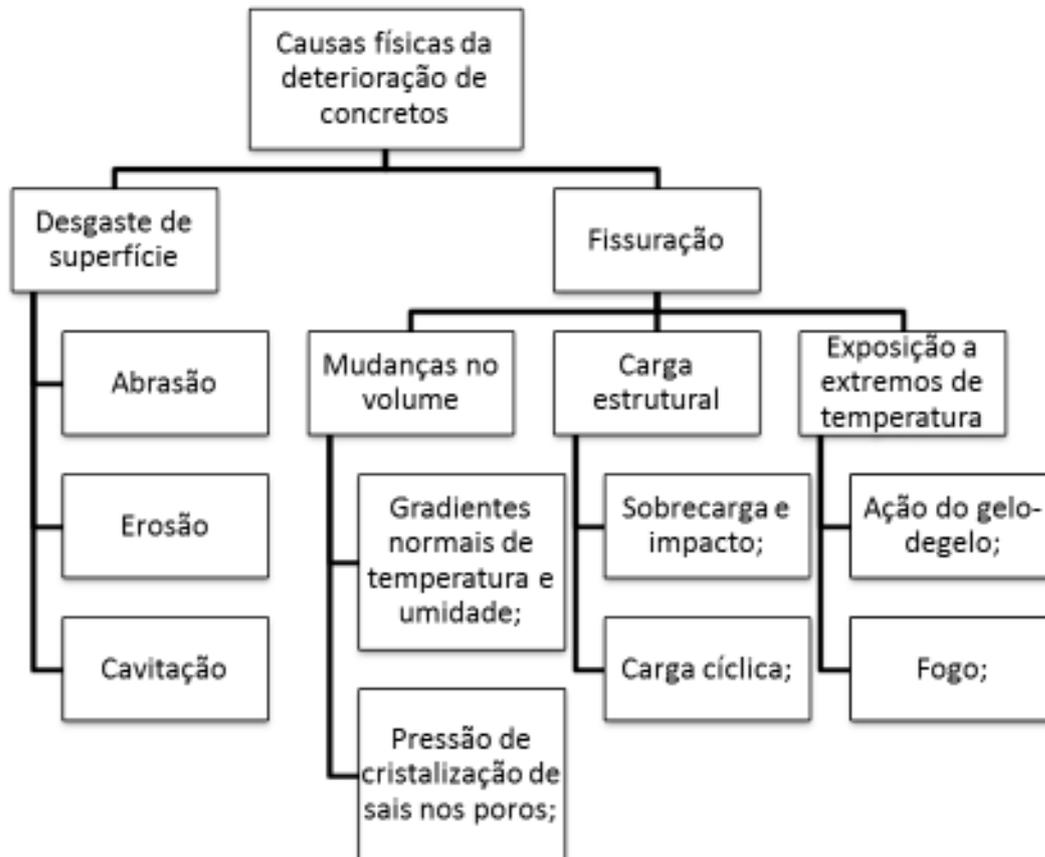
FONTE: Mehta e Monteiro (2006).

Além das estruturas formadas, efeitos de temperatura durante a cura, contaminação por sulfatos, agregados reativos podem influenciar negativamente nas propriedades dos concretos (TAYLOR; FAMY; SCRIVENER, 2001). Esses efeitos são discutidos no subitem 2.2.3.

2.2.3 Desgastes por efeitos físicos e químicos no concreto

Quando trata-se de degradação de concreto, raramente apenas um tipo de mecanismo ocorre. Na prática, se observa a superposição de mecanismos de deterioração (SILVA, 2011), classificados como causados por efeitos físicos e químicos. Mehta e Monteiro (2006) classificaram os efeitos físicos responsáveis pela deterioração do concreto como os apresentados na FIGURA 2.5.

FIGURA 2.5 - DETERIORAÇÃO DO CONCRETO POR EFEITOS FÍSICOS.



FONTE: Mehta e Monteiro (2008).

O desgaste da superfície e, conseqüente, perda de massa por abrasão remetem-se ao atrito seco (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Os concretos mais resistentes à abrasão são aplicados à pavimentação, construção de estradas de concreto, vertedouros de barragens, ou em outras superfícies, sobre as quais são aplicadas forças abrasivas (THOMAS *et al.*, 2016).

A erosão no concreto é o termo utilizado para descrever o desgaste pela ação de fluidos que contenham partículas sólidas carregadas. A ocorrência principal é documentada em estruturas com o contato entre o concreto e água e esgoto, como em revestimentos de canais, vertedouros e tubulações. (MEHTA; MONTEIRO, 2006; NEVILLE, 2005).

Outro mecanismo de degradação por desgaste de superfície é denominado cavitação, comum quando se tem fluxo de água com mudanças de direção repentinas como em desníveis, por exemplo. No fluxo de água, há a formação de bolhas de vapor pela queda da pressão absoluta local ao nível da pressão de vapor

da água a temperatura ambiente. Essas bolhas, que podem ser grandes e isoladas, ou até mesmo um conjunto de pequenas bolhas, fluem juntamente com a água. No momento que entram em águas de maior pressão, no impacto do nível inferior, se rompem causando a entrada de água na pequena área antes ocupada pelo vapor. Neste ponto, a pressão torna-se extremamente elevada em uma pequena área em um pequeno espaço de tempo. Esse efeito contínuo e em alta frequência provoca cavidades localizadas no concreto que está em contato, proporcionando a irregularidade da superfície (NEVILLE, 2013).

O processo de fissuração de estruturas de concreto pode ocorrer por uma mudança de volume, por exemplo, pelo contato de um concreto permeável com uma solução salina, sujeito à evaporação, descamando a pasta de cimento (BRAGANÇA, 2014; VILASBOAS, 2004), sobrecarga estrutural ou exposição por extremos de temperatura, por exemplo, por ciclos de gelo-degelo, que acabam causando a fissuração e o deslocamento do concreto, pela expansão da matriz da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Além do desgaste por efeitos físicos, há também o desgaste por efeitos químicos. Segundo Bragança (2014), a pasta constituída de cimento Portland hidratado, após endurecimento, é composta por diferentes hidratos de cálcio insolúveis, os quais estão em equilíbrio com a solução presente em seus poros, compreendendo um meio de pH alcalino. No entanto, quando exposto a ambientes com pH ácidos ou, no caso da pasta apresentar permeabilidade, reações químicas de deterioração são favorecidas. As principais manifestações patológicas que ocorrem, mais frequentemente, em concretos estão apresentadas no QUADRO 2.4.

QUADRO 2.4 - MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NO CONCRETO POR EFEITOS QUÍMICOS

Percolação de água	Provoca a lixiviação dos íons cálcio presentes no cimento e o seu transporte para a superfície do concreto, causando diminuição da resistência mecânica e o aumento da porosidade; corrosão da armadura.
Contato com dióxido de carbono	Provoca a carbonatação, reação dos produtos de hidratação do cimento com o CO ₂ , formando frentes uniformes de carbonato de cálcio, ocasionando a diminuição da resistência mecânica e a fissuração; corrosão da armadura.
Ataque por sulfatos	O contato com íons SO ₄ ²⁻ presente no ar, água, solo ou em agregados contendo sulfeto mineral, provoca a reação dos produtos de hidratação do cimento com íons sulfato, formando cristais expansivos de etringita, gipsita e taumasita, causando fissuração e ruptura do concreto e corrosão da armadura.
Íons cloreto	Derivados de aerossóis presentes em atmosfera litorânea, proporcionando a corrosão da armadura devido à despassivação por íons cloreto, causando fissuração e ruptura do concreto e a corrosão da armadura.
Agregados silicosos reativos	A reação álcali-agregados baseia-se na reação entre os produtos de hidratação do cimento com os minerais silicosos reativos presentes nos agregados, formando subprodutos com propriedades expansivas, causando fissuração e ruptura do concreto e corrosão da armadura.

FONTE: Glasser *et al.* (2008 apud Bragança, 2014)

Os efeitos da degradação observados no concreto e o diagnóstico do mecanismo patológico de degradação nem sempre são facilmente identificáveis, já que estes podem ocorrer de forma sobreposta (MIZUMOTO, 2009). Tais mecanismos são função da permeabilidade do material e sua velocidade é

proporcional ao tipo e concentração de íons presentes entre a pasta de cimento e o agregado ou, ainda, pelo número, tipo, tamanho e distribuição dos poros presentes no cimento (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

No caso da degradação por reação álcali-agregado (RAA) há a geração de gel expansivo formado na zona de interface de pasta de cimento, superfície do agregado e os vazios do concreto. Esse gel acaba deslocando os constituintes da mistura cimentícia, causando fissuras na estrutura, denominadas fissuração em mapa (FIGURA 2.6). Tais deslocamentos podem comprometer a resistência e elasticidade de um concreto afetando seriamente a durabilidade do concreto (MIZUMOTO, 2009; HASPARYK, 2005). Essa ocorrência adicionada à exsudação do gel na superfície do concreto, bordas ao redor dos agregados, preenchimento dos poros com material branco ou vítreo, microfissurações e descoloração no concreto são características de RAA (HASPARYK, 2005).

FIGURA 2.6 - FISSURAÇÃO EM FUNDAÇÕES AFETADOS PELA RAA.



FONTE: Mizumoto (2009).

O processo químico no qual a RAA é baseada ocorre conforme o tipo e mineralogia do agregado reativo envolvido e pode ser classificado de três formas, descritas no QUADRO 2.5:

QUADRO 2.5 - MECANISMOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Mecanismo	Descrição
Reação Álcali-Silica (RAS)	<p>A RAS é o tipo de RAA mais conhecida e relatada no meio técnico, devido a seu mecanismo ser mais facilmente detectado pelos ensaios de reatividade.</p> <p>Ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais envolvidas (rochas sedimentares, metamórficas e ígneas).</p>
Reação Álcali-Silicato (RASS)	<p>Segundo Regourd (1988), esta reação possui o mesmo princípio da RAS, no entanto, a RASS geralmente se desenvolve de forma mais lenta, pelo fato dos minerais reativos serem mais disseminados na matriz, ocorrendo mais lentamente. Os minerais envolvidos, também como no caso da RAS, são alguns tipos de silicatos presentes em rochas sedimentares, metamórficas e ígneas.</p>
Reação Álcali-Carbonato (RAC)	<p>A RAC envolve uma interação química entre os álcalis e as dolomitas presentes nos calcários, promovendo a formação da brucita ($Mg(OH)_2$), processo conhecido como “desdolomitização”, que gera fissurações e o enfraquecimento da zona de transição.</p>

FONTE: Mizumoto (2009); Hasparyk (2005). Modificado pela autora.

A reatividade dos agregados a serem empregados em misturas cimentícia pode ser estudada por três metodologias de ensaio: (i) a petrografia, que pondera as fases dos agregados, verificando os minerais potencialmente envolvidos nas reações álcali-agregado; (ii) os ensaios acelerados, normatizados pela ASTM C 1260 ou NBR 15.577 (ABNT, 2008), que consistem em submeter uma amostra, fabricada em barras com um traço padrão e o agregado a ser estudado, em solução aquosa 1,0 N de NaOH, a 80 °C, propício a RAA, e verificar a variação dimensional ao longo do tempo por um período de 16 a 30 dias; e (iii) a metodologia da norma ASTM C 1293, que demanda que sejam confeccionados prismas de concreto, com adição do agregado a ser estudado e que estes sejam submetidos a ambiente de elevada umidade e temperatura de 38 °C por 365 dias, avaliando, também, a expansividade dos corpos de prova, sendo os limites estabelecidos em 0,04% após a conclusão do ensaio.

No caso de serem detectados minerais potencialmente reativos, pelo ensaio de petrografia, e confirmada a reatividade pelos ensaios acelerados, devem ser consideradas a escolha de novo agregado comprovadamente não reativo ou, caso seja a única jazida disponível na região, devem ser testada a utilização de cimento com baixo teor de álcalis e/ou adições minerais com intuito de mitigar a RAA. Para o uso correto do cimento e das adições, estes devem ser novamente investigados com a realização de ensaios de reatividade, seguindo normas para o estudo da reatividade em misturas com adições, objetivando a redução das expansões causadas pela RAA (HASPARYK, 2005).

A durabilidade do concreto está diretamente ligada à sua capacidade de resistir à ação do tempo, aos ataques físicos e químicos. Portanto, visando uma maior durabilidade, é importante conhecer os materiais que o constituirão e suas dosagens, verificando suas características individualmente e em conjunto, quando aplicados em ambientes nocivos a sua estrutura, como lugares úmidos, ou sob efeitos de abrasão ou sobrecarga (RODRIGUES, 1998).

2.2.4 Normas NBR 9781:2013 e 15577-4:2008

A pavimentação e sua história confundem-se com a história das cidades e das civilizações (SERAFIM, 2010). Sua utilização iniciou-se com pavimentos revestidos por pedras, em 5000 AC, sendo também, muito utilizada pelos romanos desde 2000 AC. A tecnologia da pavimentação, ao longo dos anos, evoluiu, passou a trabalhar com pedras talhadas, os chamados paralelepípedos, e então, devido à produção basicamente artesanal e a trepidação causada pelas irregularidades do piso, investiu-se na fabricação de pré-fabricados de concreto, no final do século XIX, sendo fortalecida na década de 1970, quando chegou ao Brasil (PORTLAND, 2010; GODINHO, 2009).

A durabilidade e o desempenho dos pavimentos de concreto se devem à capacidade de resistir a movimentos de deslocamento individual, dados por forças verticais, horizontais ou de rotação em relação a seus vizinhos. A propriedade responsável por tal característica e, portanto, sua vasta aplicabilidade, é o intertravamento das peças. Para isso, é necessária a contenção lateral, impedindo o

deslocamento dos blocos, e a areia de selagem entre estes, que permite que suportem as cargas aplicadas (PORTLAND, 2010).

Requisitos técnicos dos pavimentos intertravados são normatizados pela ABNT NBR 9781 (ABNT, 2013), que determina as metodologias de ensaios e as especificações a serem respeitadas para a utilização destes pavimentos. A norma padroniza as características e as propriedades do pavimento, por meio da execução de ensaios de inspeção visual, avaliação dimensional, absorção de água, resistência à compressão e resistência a abrasão, sendo esta última, facultativa. A realização destes ensaios possibilita a avaliação das propriedades destes pavimentos, quando aplicados no calçamento. Por exemplo, a absorção de água fornece informações quanto à permeabilidade da peça de concreto, bem como a durabilidade do pavimento é relacionada à sua capacidade de resistência a abrasão.

No entanto, quando aplicado no calçamento, a peça de pavimento está exposta a processos de degradação causados por efeitos físicos e químicos, pelo tráfego, agentes climáticos e do tempo, que mesmo que lentos, no caso de pavimentos bem construídos, ainda contribuem para a deterioração do concreto. Conhecer os agentes e a evolução da degradação é relevante para selecionar os materiais constituintes e a sua aplicação (AZEVEDO, 2016).

Com o intuito de auxiliar nos estudos de agregados utilizáveis para o concreto e estabelecer requisitos de aceitação dos mesmos, minimizando efeitos nocivos às peças de concreto finais, foi criada em 2008 a ABNT NBR 15577, intitulada “Agregados - reatividade álcali-agregado”, que “estabelece os requisitos para uso de agregados em concreto, tendo em vista as medidas necessárias para evitar a ocorrência de reações expansivas deletérias devido às reações álcali-agregado, e prescreve a amostragem e os métodos de ensaios necessários à verificação desses requisitos” (ABNT, 2008).

A construção e a manutenção da infraestrutura do país consomem até 75% dos recursos naturais extraídos, sendo a cadeia produtiva do setor, a maior consumidora destes recursos da economia (SILVA *et al.*, 2008). Nesse sentido, para a melhor aplicação dos recursos naturais extraídos e a redução de custos na manutenção após as construções, se faz necessário o estudo dos processos de deterioração do concreto e seus mecanismos.

Contribuindo para a redução da extração de recursos naturais com a reutilização de resíduos industriais e objetivando a conservação da qualidade dos

materiais utilizados no nosso cotidiano este trabalho se faz necessário para o entendimento da aplicação da ADF como agregado parcial em pavimentação, investigando suas consequências nas características técnicas e ambientais da solução proposta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo compreendeu a utilização de três tipos de ADFs, produzidas por adição de diferentes aglomerantes e provenientes de fundidoras distintas, localizadas na Região Metropolitana de Curitiba, para a avaliação da viabilidade técnica e ambiental de substituição da AF (areia fina) pela ADF na fabricação de pavimentos de concreto.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS

As ADFs utilizadas neste estudo são diferenciadas pelos aglomerantes adicionados à areia base no processo de preparo da areia de molde e macharia, conferindo a areia de fundição distintas propriedades. Os tipos de ADFs empregadas neste trabalho são comumente denominados Areia Silicato de Sódio, Areia Fenólica e Areia Verde. Para efeito de identificação dos materiais, foram denominados ADF Silicato, ADF Fenólica e ADF Verde, respectivamente. Os materiais são apresentados na FIGURA 3.1.

FIGURA 3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO



FONTE: A autora (2017).

De modo a comparar os resultados obtidos nos ensaios realizados neste trabalho com as ADFs e os pavimentos fabricados com as mesmas, foi utilizado

traço referência comercial (TABELA 3.5), já empregado por fabricante de pavimentos intertravados da Região de Metropolitana de Curitiba, que possui a AF como parte dos agregados miúdos em proporção de 12% em relação aos demais agregados do traço.

3.1.1 Areia descartada de fundição aglomerada com silicato de sódio

Areia de fundição aglomerada com solução aquosa de silicato de sódio é utilizada pela fundidora para a fabricação de machos, os quais preenchem cavidades internas nas peças metálicas produzidas, sendo denominada areia de macharia. É utilizada na fabricação de peças de alumínio aplicadas na indústria mecânica em geral. O resultado de análise química da resina de silicato de sódio fornecida pelo fabricante consta na TABELA 3.1.

TABELA 3.1 - RESULTADO DE ANÁLISE QUÍMICA DA RESINA DE SILICATO DE SÓDIO

Análise	Unidade	Especificação	Resultado
Na₂O	%	14,50 a 16,00	14,82
SiO₂	%	31,00 a 35,00	32,57
Sólidos Totais	%	45,00 a 51,00	47,39
Umidade	%	49 a 55,00	52,61
Relação(SiO₂/Na₂O)	p/p	2,10 a 2,40	2,197
Densidade 25°C	g/cm ³	1,57 a 1,60	1,578
Aparência Física		Líquido viscoso	Líquido viscoso

FONTE: Mianos (2016).

São descartadas diariamente 120 kg de ADF Silicato pela fundidora em questão, resultando em uma quantia mensal de 2400 kg, a qual é destinada a aterro industrial de Curitiba.

Para a execução do estudo, a ADF Silicato foi coletada em três lotes diferentes, os quais foram homogeneizados e quarteados para a utilização neste estudo.

3.1.2 Areia descartada de fundição aglomerada com resina fenólica

Utilizada para a fabricação de peças fundidas com ferro cinzento e nodular, com aplicações nas indústrias automotiva, de implementos agrícolas, implementos ferroviários, indústria de máquinas e indústria hidráulica. areia de fundição aglomerada com resina fenólica utilizada neste estudo foi fabricada pelo processo *Crios Set*. Neste, a areia é misturada a uma resina fenólica específica e poliisocianatos, em proporção de 1 a 2% em massa em relação a areia, mantendo a proporção de um para um de resina fenólica e polisocianatos. A mistura é curada por um catalisador de piridina diluído em solventes aromáticos, em proporção de 1 a 10% da quantidade de resina fenólica adicionada. A areia produzida pelo processo *Crios Set* é aplicada na produção de machos e moldes em fundições de aços, ferros fundidos e ligas não ferrosas (SI GROUP, 2015).

Não foi fornecida, pela fundidora, a quantidade descartada do resíduo de ADF.

3.1.3 Areia descartada de fundição a verde

Utilizando areia a verde de fundição, a fundidora produz exclusivamente tampões e grelhas em ferro nodular. Como mencionado anteriormente, a areia a verde é a areia de fundição mais largamente utilizada no mundo, sendo bastante aplicada em estudos de reciclagem externa quando esta não apresenta mais as características necessárias para a reaplicação na fundição.

São descartadas aproximadamente 100 ton mensais pela fundidora, que são classificadas anualmente conforme NBR 10.004 (ABNT, 2004) e destinadas a aterro industrial de Curitiba.

3.1.4 Cimento

O cimento utilizado para a fabricação dos pavimentos foi o CP II F32, já utilizado no traço comercial para a fabricação dos pavers. O CP II F32 é o cimento portland composto com fíler, que tem como característica uma secagem rápida e coloração mais clara, devido à adição apenas de fíler calcário e gesso. Este tipo de cimento é versátil, com trabalhabilidade adequada às mais diversas aplicações. A

composição química do cimento utilizado no estudo, fornecida pelo fabricante, é apresentada na TABELA 3.2.

TABELA 3.2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL DO CIMENTO CP-II F UTILIZADO NA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

	Média (%)	Desvio Padrão
CaO	61,35	0,33
SiO₂	18,75	0,30
Perda ao fogo	4,82	0,25
Al₂O₃	4,20	0,10
MgO	3,99	0,27
Fe₂O₃	2,70	0,07
SO₃	2,72	0,06
CaO Livre	0,55	0,08
Resíduos Insolúveis	1,34	0,14
Equivalente Alcalino	0,75	0,01

Fonte: Cimento Itambé (2016).

3.1.5 Agregados

Os agregados utilizados no estudo são pertencente ao traço padrão comercial e empregados em todos os quatro traços estudados, sendo a areia natural, proveniente de areial da região metropolitana de Curitiba, e o pó de pedra, originário de pedreira de rochas basálticas. A AF é proveniente do litoral do Paraná.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

As ADFs utilizadas no trabalho foram caracterizadas pelos ensaios de difração de raios X e fluorescência de raios X, análise granulométrica, massa específica, absorção de água, reatividade álcali-agregado, microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia de raios X (MEV-EDS), lixiviação e solubilização.

Cada um dos ensaios é descrito nos subitens 3.2.1 a 3.2.9.

3.2.1 Análise mineralógica – difração de raios X

As fases cristalinas e a composição mineralógica das ADFs e da AF foram caracterizadas pela técnica de difração de raios X. As amostras foram secas, quarteadas, moídas e confeccionadas as pastilhas prensadas do pó. A análise semiquantitativa foi realizada com o equipamento Difrátômetro de Raios X da marca *PANalytical*, modelo *EMPYREAN*, com detector *XCelerator*. O software utilizado para a interpretação é o *Xpert High Score Plus*, que compara os picos gerados com as cartas padrões do *software*. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná.

3.2.2 Análise química – fluorescência de raios X

A quantificação da proporção entre os elementos presentes na amostra por meio da análise dos óxidos mais estáveis foi realizada por método semi-quantitativo de fluorescência de raios X, utilizando o equipamento Espectrômetro de Fluorescência de Raios X da marca *PANalytical*, modelo *Axios Max* e *software* para interpretação *SuperQ 5I*. O equipamento está disponível no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná.

Para a análise, os materiais foram secos em estufa a 50 °C por 12 h, quarteados, pulverizados e fracionados para ensaio de perda ao fogo e a confecção das pastilhas. A perda ao fogo foi realizada por aquecimento a 1000 °C por 2 h em mufla. Para as pastilhas foram adicionados a cada 7,0 g de amostra, 1,4 g de cera orgânica, as quais foram homogeneizadas, prensadas e analisadas no equipamento.

3.2.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada para os quatro tipos de areia: a AF, já utilizada para a fabricação dos pavimentos intertravados de concreto e os três tipos de ADFs estudadas neste trabalho.

O ensaio foi realizado utilizando peneiras de 5, 9, 16, 32, 60, 115, 250 e 325 mesh da marca Bertel®. Foi avaliada a massa de uma quantidade de 200,0 g de material já anteriormente quarteado. Também foram medidas as massas retidas de cada peneira, para posterior uso dos dados. O material foi despejado nas peneiras e forçado ao peneiramento com água. Posteriormente, as peneiras foram submetidas

à secagem em estufa por 24 h a 100 °C. Então, as peneiras novamente foram pesadas, com o material, obtendo a massa de areia retida em cada uma delas. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná.

3.2.4 Massa específica

As amostras de ADF e AF foram ensaiadas conforme norma NBR NM 52 (ABNT, 2009) que estabelece o método para a determinação da massa específica em agregados miúdos. A massa específica, segundo NM 52 (ABNT, 2009), é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo poros permeáveis. Foram obtidos dois valores obtidos pelo ensaio normatizado e foi realizada a média, obtendo-se a massa específica média de cada um dos agregados miúdos estudados e o respectivo desvio.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas do Instituto Lactec.

3.2.5 Absorção de água

As amostras de ADF e AF foram ensaiadas conforme norma NBR NM 30 (ABNT, 2001) que estabelece o método para a determinação de absorção de água em agregado miúdo. Dos valores obtidos pelo ensaio normatizado foi realizada a média, obtendo-se a absorção de água média de cada um dos agregados miúdos estudados e o respectivo desvio.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas do Instituto Lactec.

3.2.6 Reatividade álcali-agregado

O ensaio de reatividade álcali-agregado é normatizado pela ABNT NBR 15577-4 (ABNT, 2008) e foi utilizado para a determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, de modo a avaliar a reatividade dos agregados miúdos estudados neste trabalho. Foram elaboradas barras com dimensões e traço padrão, conforme estabelecidos na ABNT NBR 15577-4 (ABNT, 2008) com 100% de substituição pelos agregados estudados. As barras contendo

cada uma das três ADFs e a AF foram mantidos em solução alcalina de NaOH e temperatura controlada. Durante 30 dias, foram realizadas as medições na dimensão longitudinal das barras, avaliando posteriormente, sua expansividade conforme parâmetros fixados na NBR 15577-4 (ABNT, 2008). O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas do Intituitos Lactec.

3.2.7 Microscopia eletrônica de varredura com análise química elementar

Para as análises morfológicas dos agregados miúdos, foi empregada a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A composição química elementar das ADFs foi realizada pela técnica de espectroscopia por dispersão de energia (Energy Dispersion Spectroscopy – EDS).

Foram obtidas micrografias das ADFs e AF a magnificações de 50, 500 e 1500 vezes. Para a caracterização por EDS as amostras foram aderidas aos portamostras e condicionadas em vácuo por 24 horas. Para a obtenção das micrografias, as amostras foram metalizadas com ouro para aquisição de melhores imagens.

O equipamento utilizado foi Microscópio Eletrônico de Varredura *TESCAN VEGA3 LMU*, disponível no Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná.

3.2.8 Ensaio de lixiviação

Nos ensaios de lixiviação as amostras tanto de ADFs quanto os pavimentos intertravados de concreto foram peneiradas em peneira de 9,5 mm Bertel®, quarteadas e reservada massa de 100,0 g. A essa massa foi adicionada uma solução de extração elaborada conforme norma de acordo com o pH da amostra em alíquota de água. As amostras foram então submetidas à agitação em Agitador Rotatório de Frascos da Merck Millipore por 18 horas \pm 2 horas, como requiere a NBR 10.005 (ABNT, 2004). As amostras com solução de extração foram filtradas em Sistema de Filtração Pressurizado da *Merck Millipore* e obtidos os extratos lixiviados, que foram submetidos às análises de quantificação das concentrações seguindo as metodologias da TABELA 3.3.

TABELA 3.3 - PARÂMETROS PARA EXTRATO LIXIVIADO

Parâmetro	Metodologia	Equipamento	Limite de Quantificação (ppm)
Arsênio	SMWW 3000	ICP-OES	0,10
Bário	SMWW 3000	ICP-OES	0,10
Cádmio	SMWW 3000	ICP-OES	0,10
Chumbo	SMWW 3000	ICP-OES	0,02
Cromo	SMWW 3000	ICP-OES	0,05
Fluoreto	SMWW 4500 F ⁻ - D	UV	0,10
Mercúrio	SMWW 3000	ICP-OES	0,005
Prata	SMWW 3000	ICP-OES	0,10
Selênio	SMWW 3000	ICP-OES	0,10

FONTE: A autora (2017).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos (LACAUT) da Universidade Federal do Paraná.

3.2.9 Ensaios de solubilização

Para a realização dos ensaios de Solubilização estabelecidos pela norma NBR 10.006 (ABNT, 2004), as amostras foram pesadas e adicionada 1000 mL de água ultrapura. Após sete dias, sob uma temperatura de até 25 °C, as amostras foram filtradas em Sistema de Filtração Pressurizado da *Merck Millipore*, obtendo o extrato solubilizado. Este foi submetido às análises seguindo as metodologias da TABELA 3.4.

TABELA 3.4 - PARÂMETROS PARA EXTRATO SOLUBILIZADO

Parâmetro	Metodologia	Equipamento	Limite de Quantificação (ppm)
Alumínio	SMWW 3000	ICP-OES	0,10
Arsênio	SMWW 3000	ICP-OES	0,002
Bário	SMWW 3000	ICP-OES	0,10
Cádmio	SMWW 3000	ICP-OES	0,005
Chumbo	SMWW 3000	ICP-OES	0,01
Cianeto	SMWW 4500 CN ⁻	IC	0,002
Cloreto	EPA 300	IC	0,50
Cobre	SMWW 3000	ICP-OES	0,01
Cromo total	SMWW 3000	ICP-OES	0,05
Fenóis Totais	SMWW 5530 C	UV	0,004
Ferro	SMWW 3000	ICP-OES	0,10
Fluoreto	SMWW 4500 F - - D	UV	0,10
Manganês	SMWW 3000	ICP-OES	0,10
Mercúrio	SMWW 3000	ICP-OES	0,0005
Nitrato	EPA 300	IC	0,50
Prata	SMWW 3000	ICP-OES	0,02
Selênio	SMWW 3000	ICP-OES	0,002
Sódio	SMWW 3000	ICP-OES	0,50
Sulfato	EPA 300	IC	0,50
Zinco	SMWW 3000	ICP-OES	0,10

FONTE: A autora (2017).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos (LACAUT) da Universidade Federal do Paraná.

3.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram moldados com traço fornecido pela fábrica de artefatos de concreto. O cimento e os agregados foram dosados conforme TABELA 3.5, por massa, em central de concreto da marca *Menegotti*, presente na fábrica.

TABELA 3.5 - DOSAGEM DOS TRAÇOS ESTUDADOS

Traço	Cimento	Agregado		Material alternativo		Fator água/cimento
		(areia natural + pó de pedra)				
Referência	1	4	AF	0,54	12%	0,21
ADF Silicato	1	4	ADF Silicato	0,54	12%	0,23
ADF Fenólica	1	4	ADF Fenólica	0,54	12%	0,23
ADF Verde	1	4	ADF Verde	0,54	12%	0,19

FONTE: A autora (2017).

As massas foram homogeneizadas em misturador planetário (FIGURA 3.2(b)), durante mesmo tempo de mistura de 35 segundos, de modo a haver homogeneização semelhante em todos os traços. A água foi dosada pelo técnico de operação da unidade, observando a consistência da mistura. A vibroprensa utilizada na fabricação dos pavimentos é marca *Menegotti* com força de prensagem de 4 ton.

Após a prensagem dos pavimentos, os corpos de prova foram colocados em câmara de cura úmida por 48 h (FIGURA 3.2(d)), a qual tinha o piso umidificado de 3 a 4 vezes ao dia, para manter o ambiente úmido, propício à cura do concreto. Depois deste período, os pavimentos foram guardados em ambiente coberto, sem condição especial de armazenamento.

FIGURA 3.2 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA



(a) Central de concreto.



(b) Misturador planetário.



(c) Tábua de pavers.



(d) Armazenamento para a cura úmida.

FONTE: A autora (2017).

3.4 AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após a moldagem e cura dos corpos de prova fabricados com as ADFs e AF, estes foram ensaiados por difração de raios X e fluorescência de raios X, inspeção visual, análise dimensional, resistência à compressão axial, absorção de água, resistência à abrasão, microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia de raios X (MEV-EDS), lixiviação e solubilização. Cada um dos ensaios realizados com intuito de avaliar os pavimentos fabricados é descrito nos subitens 3.4.3 a 3.4.8.

3.4.1 Análise mineralógica – difração de raios X

As fases cristalinas e a composição mineralógica dos pavimentos fabricados foram caracterizadas pela técnica de difração de raios X. As amostras foram britadas, quarteadas, pulverizadas e confeccionadas as pastilhas prensadas do pó. A análise semiquantitativa foi realizada em metodologia similar às análises das ADFs, conforme descrito no item 3.2.1. O equipamento está disponível no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná.

3.4.2 Análise química – fluorescência de raios X

A quantificação da proporção entre os elementos presentes na amostra por meio da análise dos óxidos mais estáveis de cada um dos elementos presentes foi realizada por método semi-quantitativo de fluorescência de raios X, utilizando metodologia similar às análises das ADFs, conforme descrito no item 3.2.2, antecedida pela britagem das peças de pavimento.

3.4.3 Inspeção visual

A inspeção visual foi realizada em seis peças de cada um dos quatro lotes estudados. Na avaliação, foram observados aspectos visuais das peças quanto à homogeneidade, regularidade nas arestas, presença de rebarbas, defeitos, delaminação ou descamação das peças, conforme exige a NBR 9781 (ABNT, 2013). Para posterior avaliação foi realizado registro fotográfico das amostras. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos (LACAUT) da Universidade Federal do Paraná.

3.4.4 Análise dimensional

A análise dimensional foi realizada conforme estabelece a NBR 9781 (ABNT, 2013), avaliando as dimensões de comprimento, largura e espessura de seis peças de cada lote de pavimentos elaborados. De acordo com o exigido pela norma, as variações não devem ultrapassar as tolerâncias dimensionais especificadas na TABELA 3.6.

TABELA 3.6 - TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS DAS PEÇAS DE CONCRETO

Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
± 3	± 3	± 3

FONTE: NBR 9781:2013.

As medições foram realizadas com os corpos de prova acondicionados em temperatura ambiente e com o auxílio de um paquímetro da marca *Mitutoyo*, de resolução 0,01mm. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) dos Institutos Lactec.

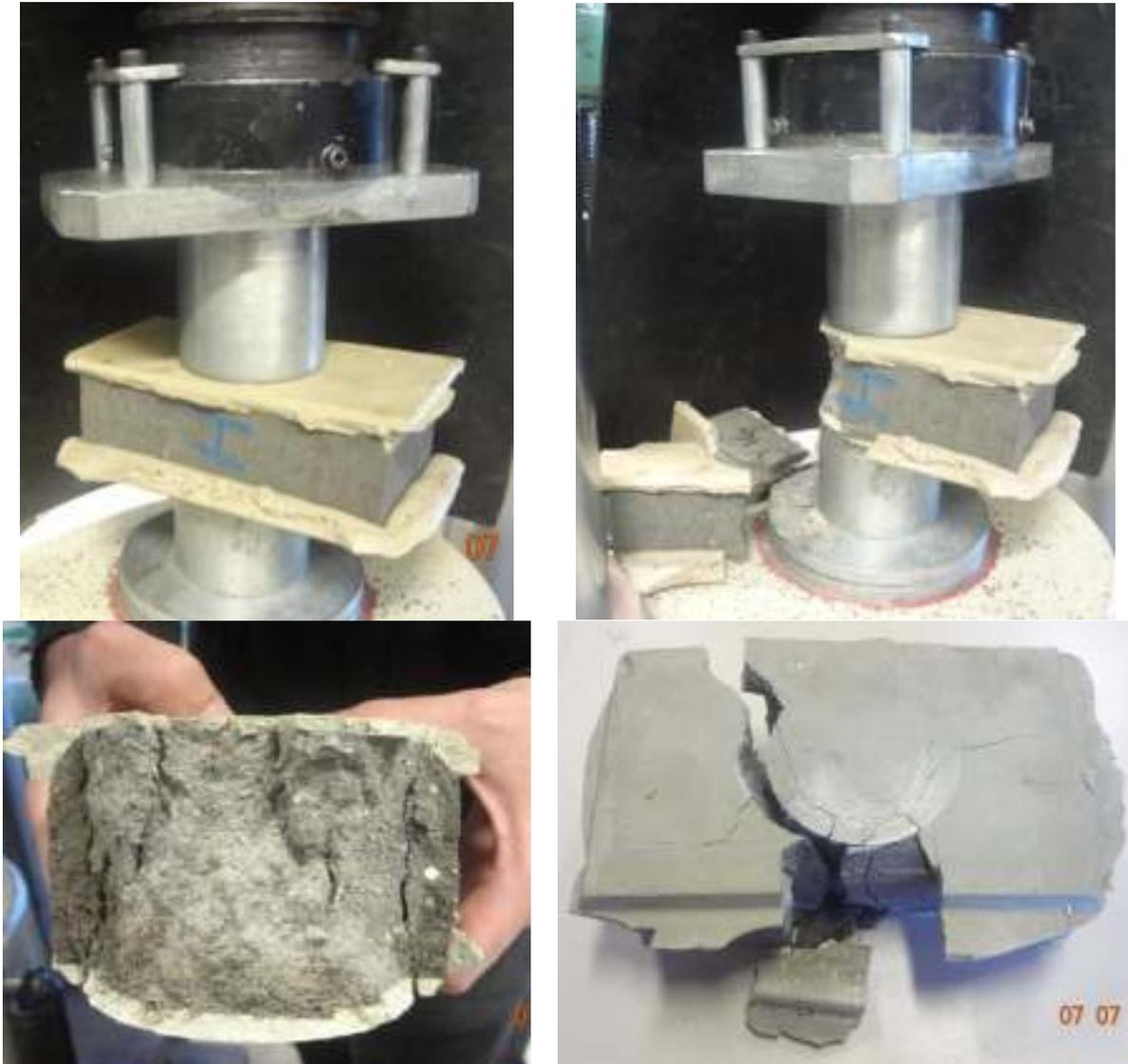
3.4.5 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em seis amostras, conforme descrito na NBR 9781 (ABNT, 2013), para os quatro lotes de pavimentos intertravados estudados. Os ensaios foram realizados em três idades das peças: 7, 28 e 91 dias, de modo a avaliar a evolução da propriedade, para cada uma das amostras, ao longo do tempo, evidenciando os possíveis efeitos dos diferentes agregados nas características finais dos pavimentos. Os ensaios foram realizados conforme estabelece a NBR 9781 (ABNT, 2013). A máquina de ensaio de compressão utilizada nos ensaios é da marca EMIC com capacidade de compressão de 2000 kN.

As placas auxiliares utilizadas para o ensaio foram circulares, com diâmetro de 89,9 mm, conforme estabelece a norma em questão.

Antes da realização do ensaio, as amostras tiveram suas superfícies retificadas com recapeamento de enxofre e foram saturadas em tanque contendo água por 24 horas. No momento do ensaio, foi removido o excesso de água da superfície das amostras com um pano seco, sendo as mesmas colocadas perpendicularmente às duas placas, como na FIGURA 3.3.

FIGURA 3.3 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO



FONTE: A autora (2017).

A resistência característica ($f_{pk\ est}$) foi determinada pela Equação 3.1:

$$f_{pk\ est} = f_p - t \cdot s \quad 3.1$$

Onde:

$f_{pk\ est}$ é a resistência característica estimada à compressão (MPa);

f_p é a resistência média das peças (MPa);

t é o coeficiente de Student, em função do tamanho da amostra, fornecido pela Tabela A.2 da NBR 9781:2013, sendo utilizado para o caso $t = 0,920$.

s é o desvio-padrão da amostra (MPa) obtida pela Equação 3.2:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \quad 3.2$$

Sendo:

f_{pi} é a resistência individual das peças (MPa);

n é o número de peças da amostra;

O requisito da norma NBR 9781 (ABNT, 2013) exige que o pavimento aplicado ao tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha devem possuir resistência característica à compressão, aos 28 dias de idade, maior ou igual a 35 MPa. Para a verificação da real diferença dos resultados obtidos, os valores de resistência à compressão axial foram tratados por análise de variância, utilizando o teste de Tukey realizando comparações duas a duas verificando a diferença significativa entre dois traços, com intervalo de confiança de 95%. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) dos Institutos Lactec.

3.4.6 Absorção de água

O ensaio normativo da NBR 9781 (ABNT, 2013) de absorção de água forneceu a relação de incremento na massa de um sólido poroso causado pela penetração de água em seus poros permeáveis, pela massa do corpo sólido no estado seco. Foram realizadas em três corpos de prova, conforme requisito de norma, de cada lote em três idades: 7, 28 e 91 dias com intuito de verificar a permeabilidade das peças.

Para a verificação da real diferença dos resultados obtidos, os valores de absorção de água também foram tratados por análise de variância, utilizando o teste de Tukey realizando comparações duas a duas verificando a diferença significativa entre dois traços, com intervalo de confiança de 95%.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) dos Institutos Lactec.

3.4.7 Resistência à abrasão

Com o intuito de verificar a resistência à abrasão dos pavimentos fabricados e também de modo a atender integralmente a NBR 9781 (ABNT, 2013) o ensaio de abrasão foi realizado nos quatro traços fabricados.

O ensaio consistiu em avaliar a capacidade de resistência à abrasão de três peças de cada lote de modo a obter informações quanto à durabilidade dos pavers. O ensaio consiste em aproximar um disco de aço em rotação à superfície do pavimento, com auxílio de um material abrasivo, para verificar a resistência à abrasão da peça em contato com o disco (FIGURA 3.4(a)). A cavidade formada na face desgastada (FIGURA 3.4(b)), segundo NBR 9781 (ABNT, 2013) deve ser inferior ou igual a 23 mm de comprimento.

FIGURA 3.4 - ENSAIO DE ABRASÃO EM PAVERS



(a) Equipamento de abrasão



(b) Paver após o ensaio de abrasão

Com o intuito de verificar a real diferença dos resultados obtidos, os valores de resistência à abrasão foram tratados por análise de variância, utilizando o teste de Tukey realizando comparações duas a duas verificando a diferença totalmente significativa entre dois traços.

O ensaio foi realizado no Laboratório do Centro de Desenvolvimento Tecnológico em Concreto (CDTEC).

3.4.8 Microscopia eletrônica de varredura com análise química elementar

Para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com caracterização elementar dos pavimentos intertravados de concreto por espectroscopia por dispersão de energia (EDS) foi utilizado o mesmo equipamento descrito no item 3.2.7. Para tanto, a preparação dos corpos de prova consistiu em britar os pavimentos, de modo que tivessem cerca de 1 cm³, sendo a área analisada na superfície de fratura do paver. Para a caracterização por EDS as amostras foram aderidas ao porta-amostra e condicionadas em vácuo por 24 horas. Para a obtenção das micrografias, as mesmas amostras foram metalizadas com ouro.

FIGURA 3.5 - PREPARO DAS AMOSTRAS DE PAVIMENTO PARA ANÁLISE NO MEV



(a) Amostra aderida ao porta-amostra

(b) Amostra com esmalte condutivo

(c) Amostra metalizada com Au

Foram realizadas duas aquisições de imagens dos pavers: a primeira com 89 dias de cura com magnificações de 50x, 500x e 1500x; e a segunda com 194 dias de cura e magnificações de 100x, 5000x, 10000x e 15000x.

3.4.9 Ensaio de lixiviação

Nos ensaios de lixiviação as amostras de pavimentos intertravados de concreto foram britadas e peneiradas em peneira de 9,5 mm Bertel® (FIGURA 3.6(a) e FIGURA 3.6(b)), quarteadas e resevadas uma massa de 100,0 g. Então, prosseguiu-se com o procedimento descrito no item 3.2.8.

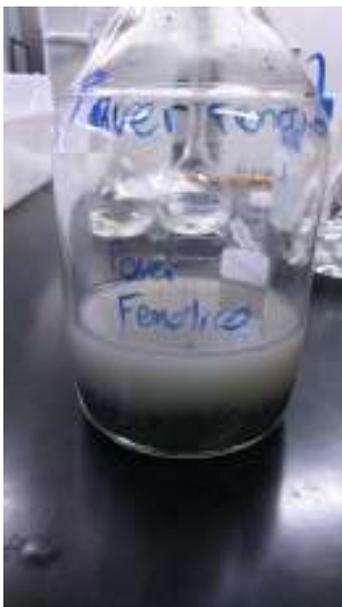
FIGURA 3.6 - ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PAVERS



(a) Peneiramento.



(b) Medição de massa.



(c) Adição da solução de extração.

(d) Agitação por \pm 18 horas.

FONTE: A autora (2017).

3.4.10 Ensaio de solubilização

Para a realização dos ensaios de Solubilização estabelecidos pela norma NBR 10.006 (ABNT, 2004), as amostras de pavimentos intertravados de concreto foram britadas e peneiradas em peneira de 9,5 mm Bertel®, quarteadas e resevadas uma massa de 250,0 g às quais foram adicionadas 1000 mL de água ultrapura (FIGURA 3.7), prosseguindo com o procedimento descrito no item 3.2.9.

FIGURA 3.7 - ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PAVERS



(a) Solubilização em incubadora com temperatura controlada.



(b) Filtração pressurizada para obtenção de extrato solubilizado.

FONTE: A autora (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para os ensaios realizados, tanto nos materiais utilizados para a fabricação dos corpos de prova como nos pavimentos fabricados, e as discussões pertinentes a cada um deles, estão apresentados no presente capítulo.

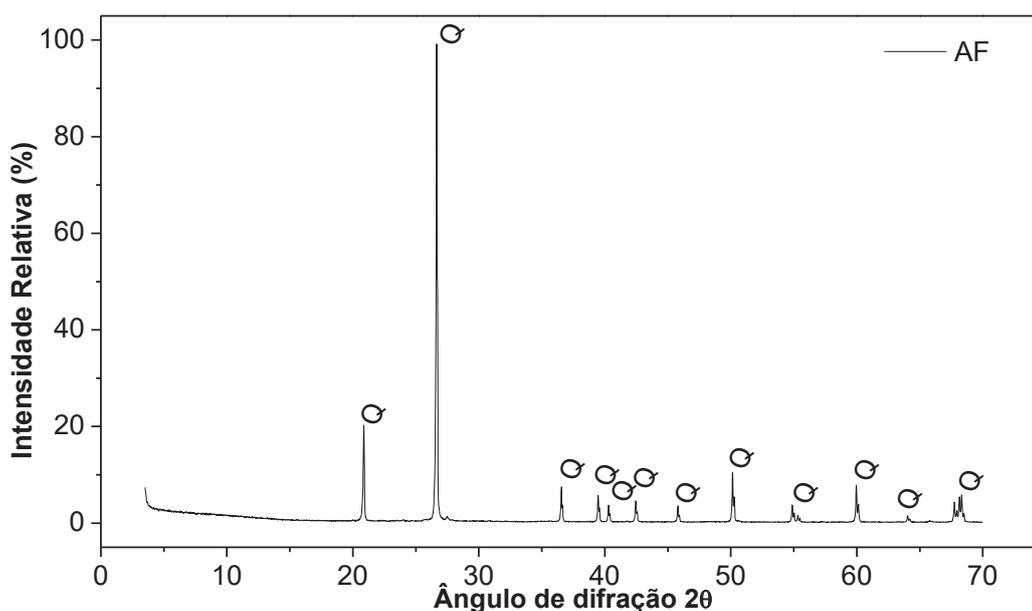
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Análise mineralógica por difração de raios X

O difratograma de raios X e a interpretação da composição mineral presente na amostra de AF estão apresentados nas FIGURA 4.1 e

TABELA 4.1, respectivamente.

FIGURA 4.1 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DA AF



FONTE: A autora (2017).

TABELA 4.1 - COMPOSIÇÃO MINERAL DA AF

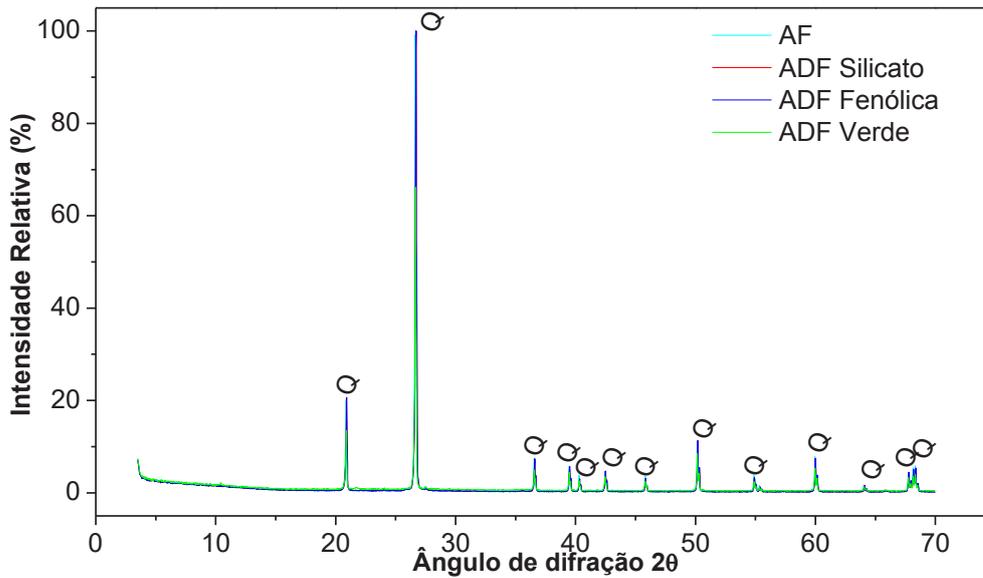
Código de Referência	Abreviatura	Nome do Composto	Fórmula Química
01-085-0504	Q	Quartzo	SiO ₂

FONTE: Software XPert High Score Plus (2011).

No difratograma da FIGURA 4.1 estão apresentados os picos característicos de estrutura cristalina, evidenciados também pela altura e constância da linha de base, similar ao verificado por Mastella *et al.* (2014).

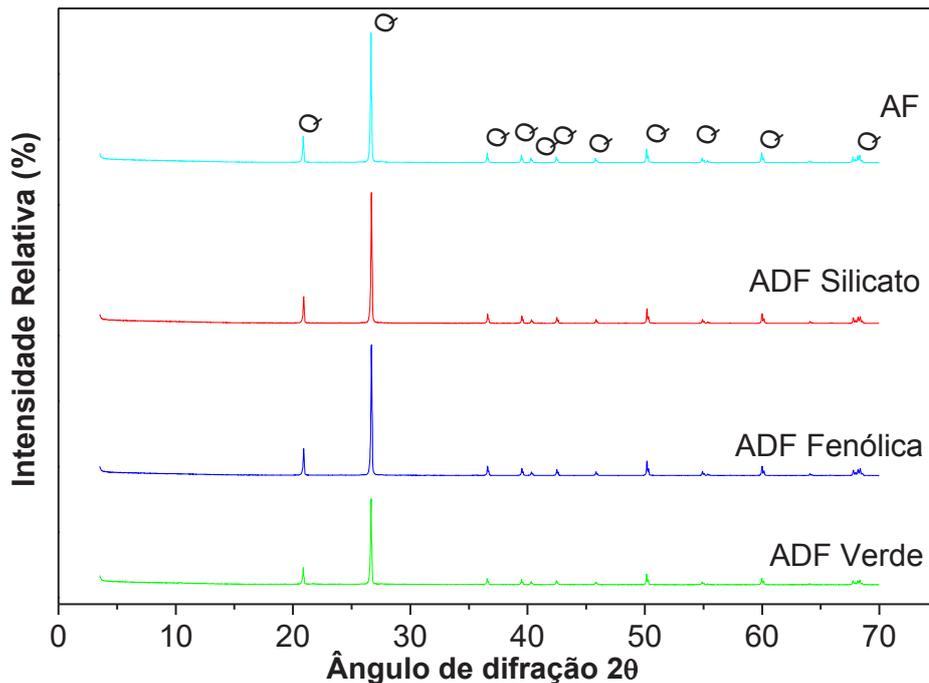
Os difratogramas apresentados na FIGURA 4.2 são relativos às amostras de ADFs e AF, já anteriormente apresentada como forma de comparação às ADFs. Com os difratogramas alinhados, perceberam-se semelhanças entre os picos e as linhas de base de cada uma das amostras, comprovando que as ADFs possuem composição típica de areia.

FIGURA 4.2 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X SOBREPOSTOS DAS AMOSTRAS DE AF E ADFs



FONTE: A autora (2017).

FIGURA 4.3 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DAS AF E ADFs



FONTE: A autora (2017).

Pela FIGURA 4.3, percebeu-se que a diferença entre as amostras é a intensidade dos picos. Isto evidenciou que, mesmo com aglomerantes diferentes, as ADFs possuem, basicamente, as mesmas estruturas mineralógicas, difratando em intensidades diferentes os raios x incididos nas amostras.

4.1.2 Análise química por fluorescência de raios X

As composições químicas das ADFs e da AF utilizada para a fabricação das peças de concreto estão apresentadas na TABELA 4.2. Em todos os materiais, confirmaram-se um alto teor de SiO_2 , sendo os maiores valores para a AF, com 96,0%, seguida das ADFs de Silicato e Fenólica com 93,4% e 93,3%, respectivamente. Por fim, a ADF Verde com 84,5% de SiO_2 . Como óxidos mais estáveis, os demais, além do SiO_2 , foram Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3 para a ADF Silicato, resultando em 1,9%, 1,2 % e 0,7 %, respectivamente. Para a ADF Fenólica, os óxidos em maior quantidade foram Al_2O_3 com 0,9% e Fe_2O_3 com 0,7%. Na ADF Verde as maiores proporções entre os óxidos foram para Al_2O_3 , Na_2O e Fe_2O_3 com 5,2%, 0,9% e 5,8%, respectivamente. As maiores proporções de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , também verificadas por Chegatti (2016) para esta ADF deve-se ao aglomerante a base de argila (bentonita). Quanto à AF os óxidos mais estáveis foram Al_2O_3 em 1,8%, e K_2O com 0,7%.

Os valores de perda ao fogo obtidos foram 1,34% para a ADF Silicato, 4,24% para a ADF Fenólica, 0,97% para a ADF Verde e 0,41% para a AF.

TABELA 4.2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS - X DAS ADFs E AF

	ADF Silicato (%)	ADF Fenólica (%)	ADF Verde (%)	AF (%)
SiO ₂	93,4	93,3	84,5	96
Al ₂ O ₃	1,9	0,9	5,2	1,8
Na ₂ O	1,2	0,1	0,9	0,1
Fe ₂ O ₃	0,7	0,7	5,8	0,3
K ₂ O	0,4	0,2	0,5	0,7
TiO ₂	0,4	0,2	0,4	0,3
CaO	0,3	0,2	0,4	0,2
MgO	0,3	0,1	0,9	0,1
ZrO ₂	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Perda ao fogo	1,34	4,24	0,97	0,41
SO ₃	0,0	< 0,1	0,2	< 0,1
CuO	< 0,1	0,0	0,0	0,0
ZnO	< 0,1	0,0	0,0	0,0
P ₂ O ₅	< 0,1	0,0	< 0,1	0,0
MnO	< 0,1	0,0	0,1	0,0

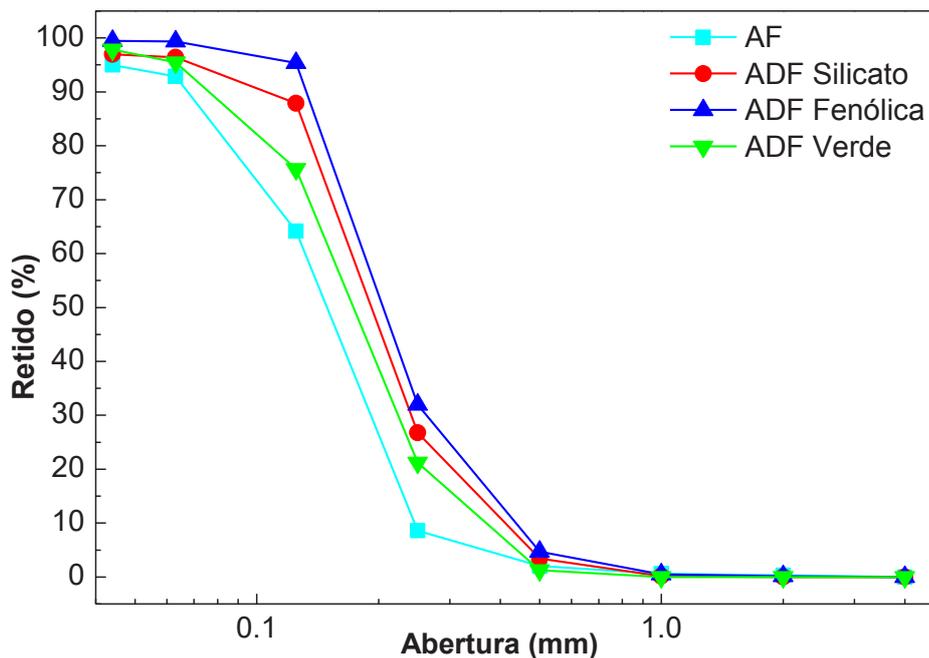
FONTE: A autora (2017).

As composições químicas percentuais obtidas pelo presente estudo são similares às reportadas na literatura pelos autores: Khatib, Herki, Kenai (2013), Mastella *et al.* (2014) e Winkler e Bol'shakov (2000), apresentando maiores percentuais de composição para SiO₂, seguidos de Al₂O₃, Fe₂O₃ e Na₂O. Para a ADF Fenólica, Mastella *et al.* (2014) também obtiveram maior percentual de SiO₂, acima de 90%, usual de 93 a 99% (SIDDIQUE e NOUMOWE, 2008) para areias com aglomerantes químicos, em comparação com a a ADF Verde, de cerca de 80 a 90% na literatura (KHATIB; HERKI; KENAI, 2013; WINKLER; BOL`SHAKOV, 2000).

4.1.3 Análise granulométrica

Os resultados das análises granulométricas realizadas para as amostras de ADFs e AF utilizadas na fabricação dos pavimentos intertravados de concreto estão apresentadas na FIGURA 4.4.

FIGURA 4.4 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS ADFS E AF



FONTE: A autora (2017).

A partir dos dados de análise granulométrica, notou-se que a ADF Verde foi a ADF mais fina e mais próxima à AF, já utilizada na fabricação dos pavimentos, seguida da ADF Silicato e, por último, a ADF Fenólica. Constatou-se que a AF é mais fina que as ADFs, sendo retida em maior proporção nas mais baixas granulometrias das peneiras. Destaca-se que, geralmente, as ADFs apresentam de 85 a 95% dos grãos entre 0,6 e 0,15 mm e 5 a 12% menores que 0,075 mm (SIDDIQUE e NOUMOWE, 2008), no entanto são reportadas ADFs com teor de finos maiores, passantes a 0,075 mm de 18% (SIDDIQUE; SCHUTTER; NOUMOWE, 2009) e 24% (GUNEY *et al.*, 2010) e menores, com 1,08% (NAIK, SINGH e RAMME, 2001).

TABELA 4.3 - PORCENTAGENS DE PASSANTES EM ENSAIO DE GRANULOMETRIA NAS AMOSTRAS DE ADFS E AF

Malha (Mesh)	Abertura (mm)	Passantes (%)			
		AF	ADF Silicato	ADF Fenólica	ADF Verde
5	4	100,00	100,00	100,00	100,00
9	2	99,69	100,00	99,86	100,00
16	1	99,43	99,83	99,49	100,00
32	0,5	97,94	96,59	95,31	98,74
60	0,25	91,44	73,22	68,03	78,79
115	0,125	35,82	12,11	4,67	24,32
250	0,063	7,11	3,57	0,63	4,51
325	0,044	5,01	3,01	0,55	2,14
<325	-	0,00	0,00	0,00	0,00

FONTE: A autora (2017).

Para efeito de comparação, da TABELA 4.3, neste estudo as ADFs apresentaram 3,57% para ADF Silicato, 0,63% para a ADF Fenólica e 4,51% para a ADF Verde, enquanto AF 7,11% passantes em 0,063 mm, com maior teor de finos que as ADFs e Basar e Aksoy (2012) trabalharam com ADF de 13,2% passante em 0,063 mm, portanto com teor de finos maior que as ADFs deste estudo. Ainda, é importante salientar que a AF possui granulometria menor que as areias naturais utilizadas em outros estudos, com teor de finos de 2,02% passantes em 0,063 mm (BASAR e AKSOY, 2012), o que representa aproximadamente 3,5 vezes menos que a AF estudada.

4.1.4 Massa específica

Os resultados de massa específica são apresentados na TABELA 4.4.

TABELA 4.4 – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA DAS AMOSTRAS DE ADFs E AF.

Amostra	Massa específica (kg/m³)	Massa específica média (kg/m³)	Desvio (kg/m³)
AF 1	2620	2610	15
AF 2	2590		
ADF Silicato 1	2550	2550	5
ADF Silicato 2	2540		
ADF Fenólica 1	2610	2620	5
ADF Fenólica 2	2620		
ADF Verde 1	2360	2310	50
ADF Verde 2	2260		

FONTE: A autora (2017).

Chegatti (2016) comenta a faixa de massas específicas mais comuns de ADFs estabelecida pela Sociedade Americana de Fundição (AFS) variando de 2390 a 2550 kg/m³. As areias estudadas neste trabalho apresentaram massas específicas variando de 2310 a 2620 kg/m³, portanto com alguns valores fora da faixa previamente estabelecida. No entanto, são relatados na literatura valores de massa específica que também se encontram fora da faixa estabelecida pela AFS, como Siddique, Schutter e Noumowe (2009) obtiveram massa específica da ADF estudada de 1520 kg/m³ e de areia natural de 1750 kg/m³ e Singh e Siddique (2012) com 2180 para ADF e 2680 kg/m³ para a areia natural.

4.1.5 Absorção de água

Os resultados de massa específica e massa específica aparente são apresentados na TABELA 4.5.

TABELA 4.5 - RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS AMOSTRAS DE ADFs E AF

Amostra	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção	Absorção Média	Desvio
AF 1	1096,4	1099,2	0,26%	0,23%	0,02%
AF 2	1064,6	1066,8	0,21%		
ADF Silicato 1	1034,2	1049,9	1,52%	1,50%	0,02%
ADF Silicato 2	1049,4	1064,9	1,48%		
ADF Fenólica 1	1065,9	1070,9	0,47%	0,46%	0,01%
ADF Fenólica 2	1073,3	1078,1	0,45%		
ADF Verde 1	998,5	1027,2	2,87%	2,84%	0,03%
ADF Verde 2	1117,4	1148,8	2,81%		

FONTE: A autora (2017).

Notou-se a maior absorção de água para as amostras de agregado fino de ADFs em relação à AF, como também foi verificado por Siddique, Schutter e Noumowe (2009) de 1,3% e de areia natural de 0,86%. Siddique e Noumowe (2008) de 5,0% e de areia natural de 1,0%, sendo utilizada ADF Verde. Em geral, na literatura é reportado menor valor de absorção de água para a areia natural em relação à ADF (KHATIB, HERKI e KENAI, 2013).

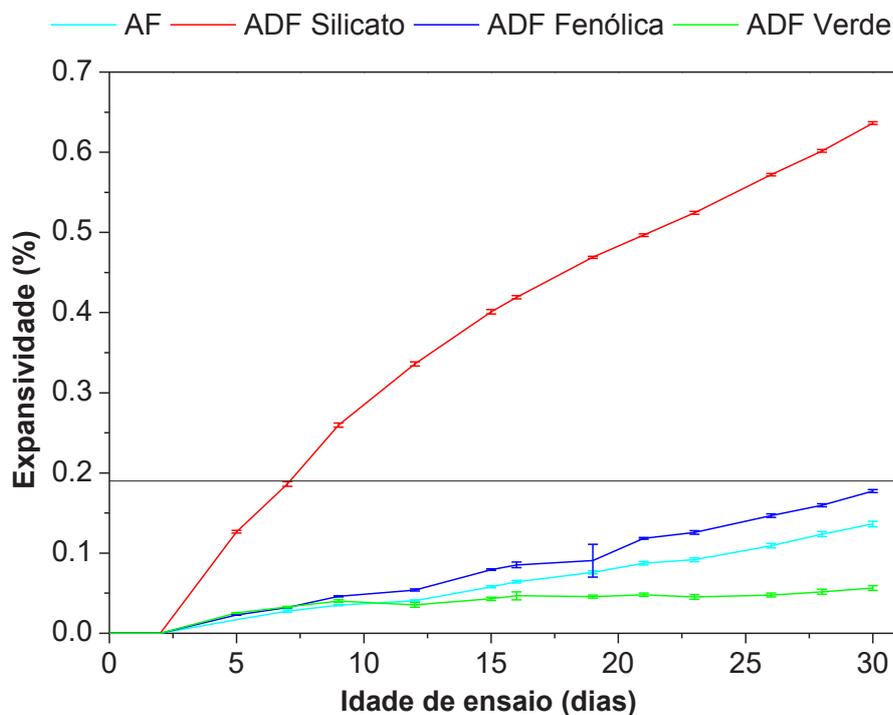
Siddique e Singh (2011) interpretam a correlação entre absorção de água, a porcentagem de finos e tamanhos dos grãos como quanto menor o tamanho dos grãos se obtém uma maior área superficial o que favorece a absorção de água.

Relacionando os resultados obtidos pelo ensaio de granulometria com o ensaio de absorção de água e os dados da literatura, com o aumento da porcentagem de finos, as ADFs apresentaram maior absorção de água. Dos resultados a ADF Verde, com porcentagem de finos de 4,51% apresentando maior absorção de água, seguida da ADF Silicato e, por último, ADF Fenólica, com menor absorção de água e menor porcentagem de finos, mostram estar de acordo com o preconizado por Siddique e Singh (2011). Possivelmente, a AF, com maior porcentagem de finos em relação às ADFs não apresentou características similares por não estar envolta por aglomerantes, como no caso das ADFs, podendo a natureza deste influenciar nessa propriedade e na necessidade de adição de água durante a mistura, em relação às ADFs Silicato e Fenólica, resultando em valores de resistência à compressão axial maiores que estas.

4.1.6 Reatividade álcali-agregado

Os resultados do ensaio de reatividade álcali-agregado, estão apresentados na FIGURA 4.5.

FIGURA 4.5 – RESULTADOS DO ENSAIO DE REATIVIDADE ÁLCALI AGREGADO NAS AMOSTRAS DE ADFS E AF



FONTE: A autora (2017).

Observou-se a maior predisposição da ADF Silicato à reação perante os demais agregados miúdos estudados, por apresentar ao final dos 30 dias de ensaio expansividade de 0,637% quando o limite por NBR 15.577-1 (ABNT, 2008) é de 0,19%. A ADF Fenólica, após o referido tempo de ensaio teve 0,177% de expansividade, estando dentro do limite de norma. Para a ADF Verde e AF, os valores foram ainda menores, 0,056% e 0,136%, respectivamente. Em consequência, a ADF Silicato, se mostrou inadequada para o uso em artefatos de concreto como substituinte total da areia utilizada, tendo em vista a alta tendência à expansão na massa cimentícia quando relacionada aos demais materiais estudados.

Na literatura Carnin *et al.* (2010) verificaram a expansividade de amostras de pavimentos fabricados com ADF Verde e constataram que a mesma não possui caráter reativo. Isto porque a ADF Verde não atingiu o valor limite de expansividade

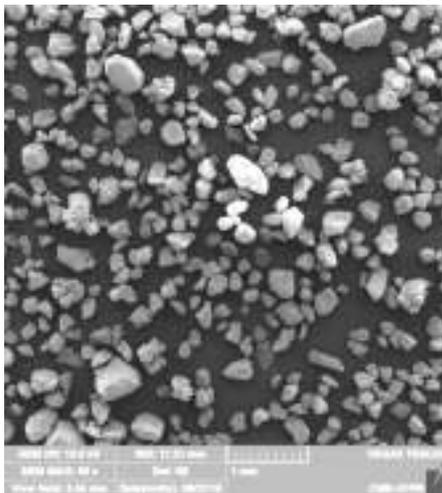
de 0,8% em ensaio normatizado pela ASTM C 151, estando de acordo com o resultado obtido no presente estudo.

4.1.7 Microscopia eletrônica de varredura com análise química elementar

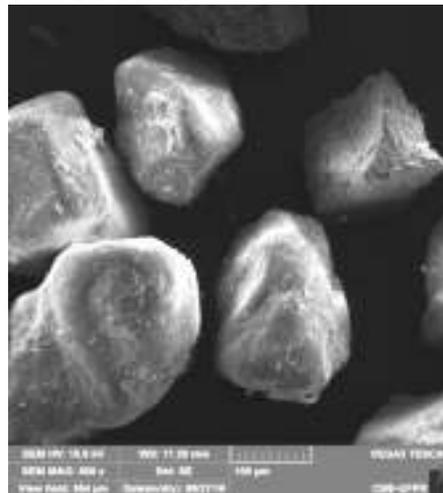
As micrografias obtidas das análises de microscopia eletrônica de varredura da AF são mostradas na FIGURA 4.6 e das três ADFs nas FIGURA 4.7 a FIGURA 4.9.

A AF possui grãos de dimensões variadas, desde 0,1 a 0,6 mm, apresentando formas irregulares, por serem muito fraturados, conforme relatado por Coelho *et al.* (2005). As superfícies dos grãos de areia fina não apresentam material aderido, como as ADFs (FIGURA 4.7 a FIGURA 4.9).

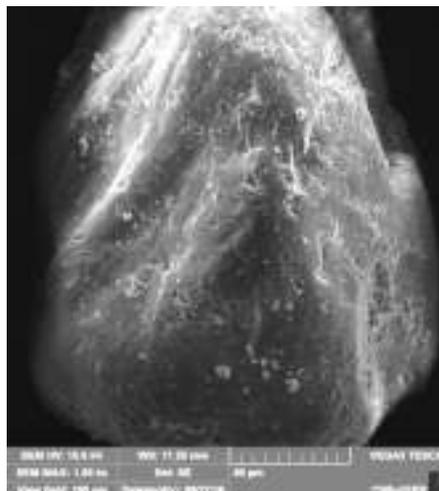
FIGURA 4.6 - MICROGRAFIAS AF



(a) 50x



(b) 500x

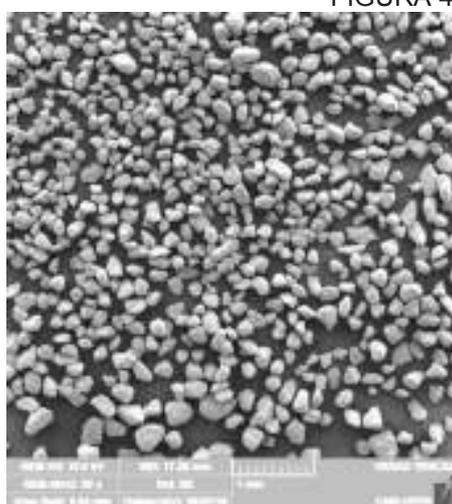


(c) 1500x

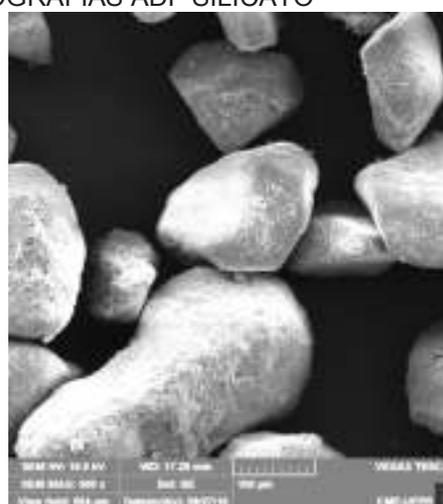
FONTE: A autora (2017).

Nas FIGURA 4.7, FIGURA 4.8 e FIGURA 4.9 estão mostrados os grãos de ADFs com dimensões heterogêneas, de acordo com o evidenciado por Pinto (2013). As formas dos grãos, em formatos irregulares, levemente arredondados nas extremidades, devem-se, provavelmente, ao processo de fundição de peças metálicas a altas temperaturas. Na superfície dos grãos, percebeu-se a presença de materiais aderidos, possivelmente os aglomerantes utilizados nas areias para a aplicação na indústria de fundição, que podem ser comprovadas pelo espectro de EDS, pelo pico de Na (FIGURA 4.11) provavelmente causado pela presença do aglomerante silicato de sódio nos grãos de areia.

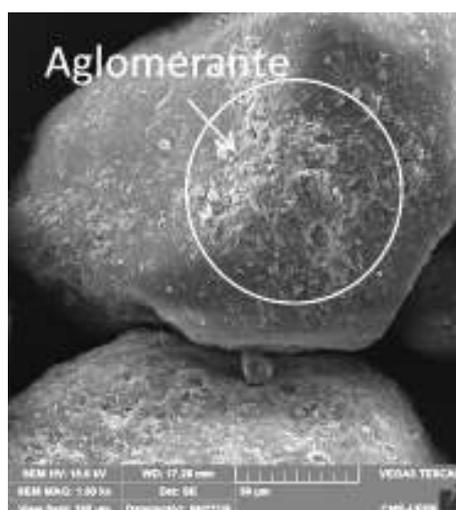
FIGURA 4.7 - MICROGRAFIAS ADF SILICATO



(a) 50x



(b) 500x

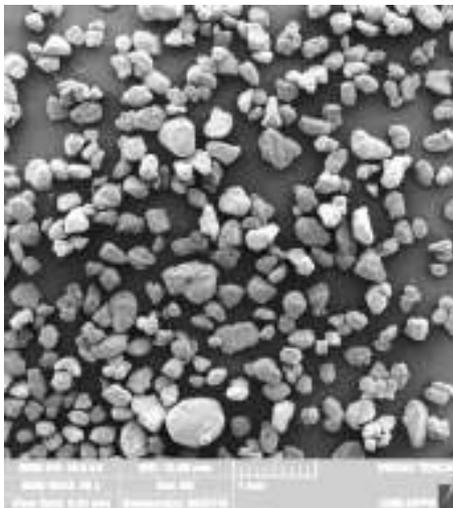


(c) 1500x

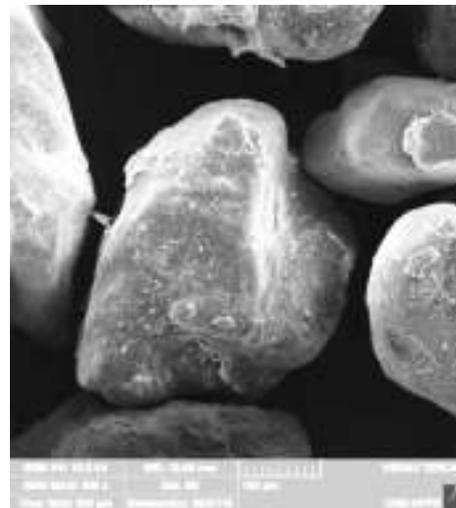
FONTE: A autora (2017).

Para a ADF Silicato, pela FIGURA 4.7 (a), observou-se grãos de areia de dimensões, em sua maioria, uniformes de 0,2 a 0,4 mm, com materiais aderidos a sua superfície (FIGURA 4.7 (b) e (c)). Na FIGURA 4.8 (a) está mostrada a imagem dos grãos de ADF Fenólica, com dimensões variadas de 0,2 mm a 0,7 mm. A FIGURA 4.8 (b) e FIGURA 4.8 (c) mostram os grãos de ADF Fenólica e a cobertura de sua superfície. No caso das ADFs utilizadas neste trabalho, a ADF Fenólica foi a única a ser regenerada para ser reencaminhada ao processo de fundição, podendo essa menor quantidade de material aderido, quando comparada às imagens das demais ADFs, ser devido a essa reutilização (CARNIN *et al.*, 2012).

FIGURA 4.8 - MICROGRAFIAS ADF FENÓLICA



(a) 50x



(b) 500x

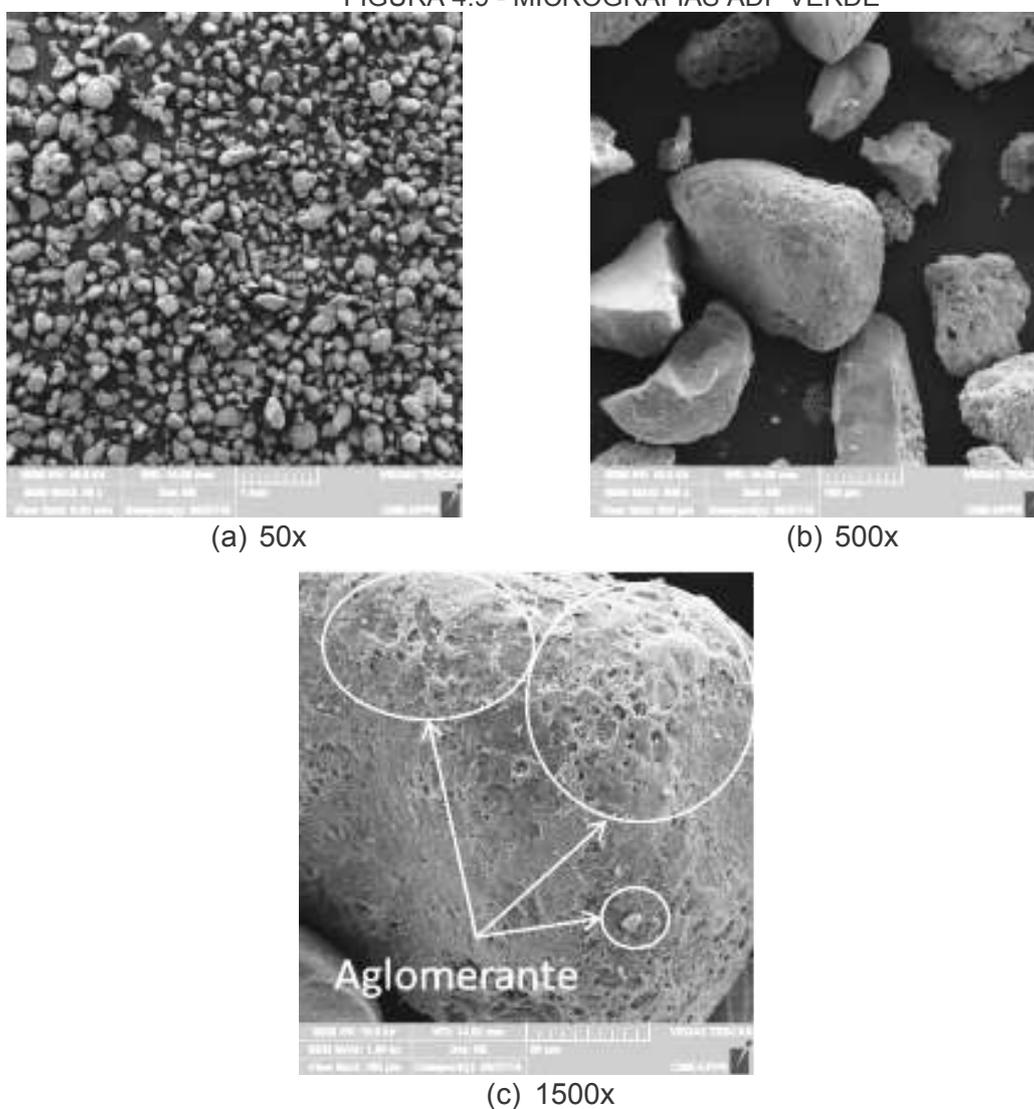


(c) 1500x

FONTE: A autora (2017).

Como demonstrado por Carnin *et al* (2012), a ADF Verde (FIGURA 4.9 (b) e (c)), depois da exposição a altas temperaturas, durante o processo de fundição, o revestimento de bentonita e pó de carvão fica descontínuo provavelmente devido à desidratação e desidroxilação das argilas, enquanto o pó de carvão passa por decomposição térmica. Além disso, é possível que o revestimento da superfície do grão de ADF passe por abrasão dos grãos de areia durante a quebra de moldes e de sua recuperação. Percebeu-se ainda uma distribuição granulométrica mais variada, quando comparada às outras ADFs, com grãos de 0,1 a 0,5 mm, aproximadamente (FIGURA 4.9 (a)).

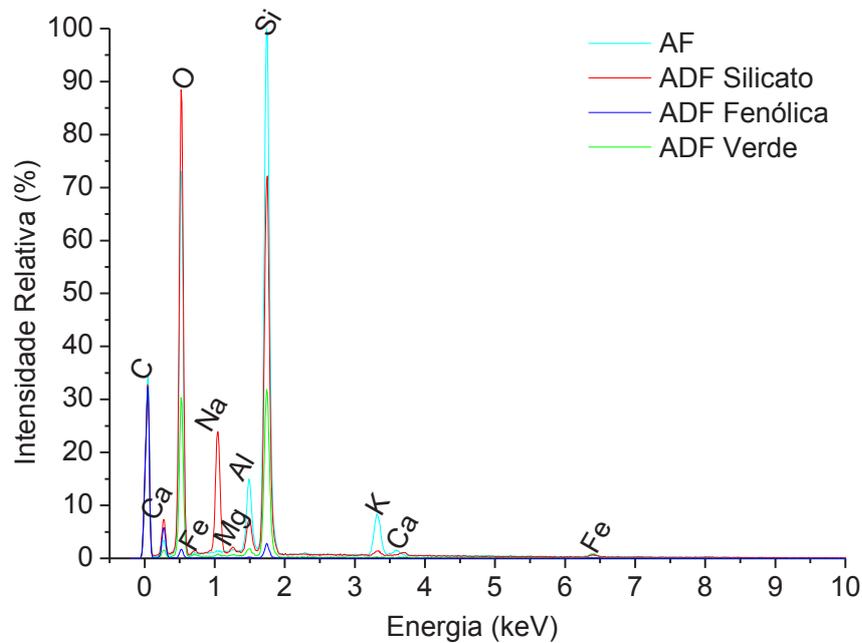
FIGURA 4.9 - MICROGRAFIAS ADF VERDE



FONTE: A autora (2017).

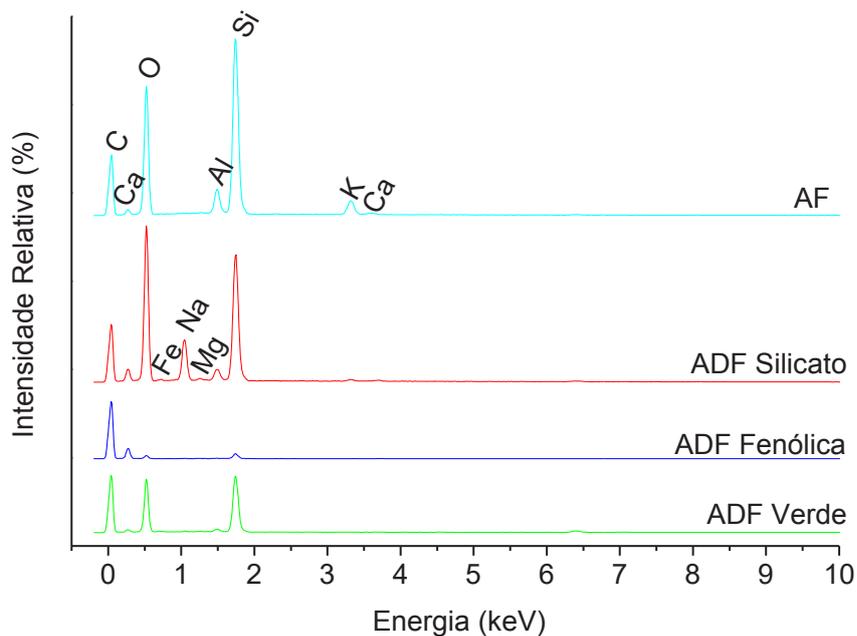
As composições químicas elementares das amostras de ADFs e AF obtidas pela técnica de espectroscopia por dispersão de energia estão mostradas na FIGURA 4.10 e FIGURA 4.11.

FIGURA 4.10 - ESPECTROS DE DISPERSÃO DE ENERGIA COM INTENSIDADES RELATIVAS E SOBREPOSTOS DAS AMOSTRAS DE ADFS E AF



FONTE: A autora (2017).

FIGURA 4.11 - ESPECTROS DE DISPERSÃO DE ENERGIA DESLOCADOS DAS AMOSTRAS DE AF E ADFS



FONTE: A autora (2017).

Dos espectros de EDS, observaram-se picos de Si e O, corroborando com os resultados de FRX, no qual o óxido mais estável de maior presença na amostra é o SiO₂, e DRX, sendo estruturado nas amostras como quartzo, de acordo com o evidenciado por Smarzewski e Barnat-Hunek (2016). No espectro da ADF Silicato, o pico expressivo de Na pode ser devido à presença do aglomerante Silicato de Sódio para o preparo da areia para ser utilizada no processo de fundição, bem como o pico de Al, já que esta ADF foi utilizada para a fundição de peças de alumínio, podendo ter permanecido residualmente na areia.

4.1.8 Ensaios de lixiviação

Os resultados dos ensaios de lixiviação, realizados para a classificação de resíduos sólidos, estão apresentados na TABELA 4.6.

TABELA 4.6 - RESULTADOS PARA EXTRATO LIXIVIADO DAS ADFS

Parâmetro	Concentração Lixiviada ADF Silicato (ppm)	Concentração Lixiviada ADF Fenólica (ppm)	Concentração Lixiviada ADF Verde (ppm)	Limite máximo no extrato (ppm) NBR 10.004:2004 Anexo H
Arsênio	< 0,010	< 0,010	< 0,010	1,000
Bário	0,2932	0,3837	0,3543	70,00
Cádmio	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,5000
Chumbo	0,1114	< 0,020	< 0,020	1,000
Cromo total	< 0,050	< 0,050	< 0,050	5,000
Fluoreto	0,800	< 0,100	< 0,100	150,0
Mercúrio	< 0,0005	< 0,0005	0,0047	0,1000
Prata	< 0,100	< 0,100	< 0,100	5,000
Selênio	< 0,100	< 0,100	< 0,100	1,000

FONTE: A autora (2017).

Dos resultados dos ensaios de lixiviação, verificou-se que, para todas as ADFs, os valores no extrato lixiviado estabelecido pelo anexo H da NBR 10.004 (ABNT, 2004) estão abaixo dos máximos permitidos. Sendo assim, as ADFs seriam consideradas como resíduo não tóxico, portanto, Classe II, pois nenhum dos limites máximos permitidos foi excedido, como o verificado por Alves *et al.* (2014), que além destes elementos, também verificou a lixiviação de Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr,

Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, V e Zn. Segundo os autores, é esperado concentrações mais elevadas nas areias residuais de Al, Ba, Fe, Mg, Mn e Zn. Além de serem encontradas na matriz de areia de sílica ou argila de bentonita, as concentrações também se elevam nas ADFs quando são transferidos durante o processo de fundição.

Em comparação aos valores de concentração do extrato lixiviado obtidos por Ji *et al.* (2001), quando estudaram a lixiviação de diferentes tipos de ADFs, encontraram valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos neste estudo para todos os elementos lixiviados, com exceção das concentrações de Bário com valores que variam de 0,210 ppm para a ADF Verde e 0,023 ppm para a ADF Fenólica.

4.1.9 Ensaio de solubilização

Os ensaios de solubilização, assim como os de lixiviação, foram realizados para a classificação conforme NBR 10.004 (ABNT, 2004) para as três ADF estudadas. Os resultados estão apresentados na TABELA 4.7.

TABELA 4.7 - RESULTADOS PARA EXTRATO SOLUBILIZADO DAS ADFS

Parâmetro	Concentração Solubilizada ADF Silicato (ppm)	Concentração Solubilizada ADF Fenólica (ppm)	Concentração Solubilizada ADF Verde (ppm)	Limite máximo no extrato (ppm) NBR 10.004:2004 Anexo G
Alumínio	3,4240	0,1573	0,5799	0,200
Arsênio	0,0209	< 0,0020	< 0,0020	0,010
Bário	0,1806	0,1702	0,0624	0,700
Cádmio	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,005
Chumbo	0,1139	< 0,010	< 0,010	0,010
Cianeto	0,014	0,019	0,017	0,070
Cloreto	14,225	2,463	6,027	250,0
Cobre	0,495	< 0,010	< 0,010	2,0
Cromo total	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,050
Fenóis Totais	0,040	8,833	< 0,002	0,010
Ferro	3,4945	0,2023	1,9382	0,300
Fluoreto	0,800	1,260	0,461	1,500
Manganês	< 0,100	< 0,100	< 0,100	0,100
Mercúrio	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,001
Nitrato	12,001	2,546	1,410	10,0
Prata	< 0,020	< 0,020	< 0,020	0,050
Selênio	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,010
Sódio	338,2755	7,281	17,315	200,0
Sulfato	6,019	3,967	9,415	250,0
Zinco	0,1756	< 0,100	< 0,100	5,0

FONTE: A autora (2017).

De acordo com os resultados obtidos pelo ensaio de solubilização realizado, as ADFs foram classificadas como Resíduo Classe II-A Não Inerte, pois alguns analitos apresentaram concentração superior ao máximo permitido no extrato solubilizado.

Para a ADF Silicato, os valores acima dos máximos permitidos foram para alumínio, fenóis totais, cianeto, ferro, nitrato e sódio este devido ao fato de ser utilizada uma solução aquosa de silicato de sódio como aglomerante no preparo do mesmo.

Os valores acima de alumínio e ferro nas amostras de ADF Silicato e ADF Verde, também verificados por Miguel *et al.* (2012), podem ser explicados pelo

contato com as peças metálicas moldadas. De acordo com o autor, o fato de que as concentrações de Al, Ba, Fe, Mg, Mn e Zn foram elevadas nas ADFs quando, em comparação com as areias naturais, é de pouca preocupação, uma vez que as concentrações destes elementos são naturalmente altas em solos nativos (SHACKLETTE e BOERNGEN, 1984) e não estão associados à degradação ambiental, sob condições normais (CHANEY e CODLING, 2005).

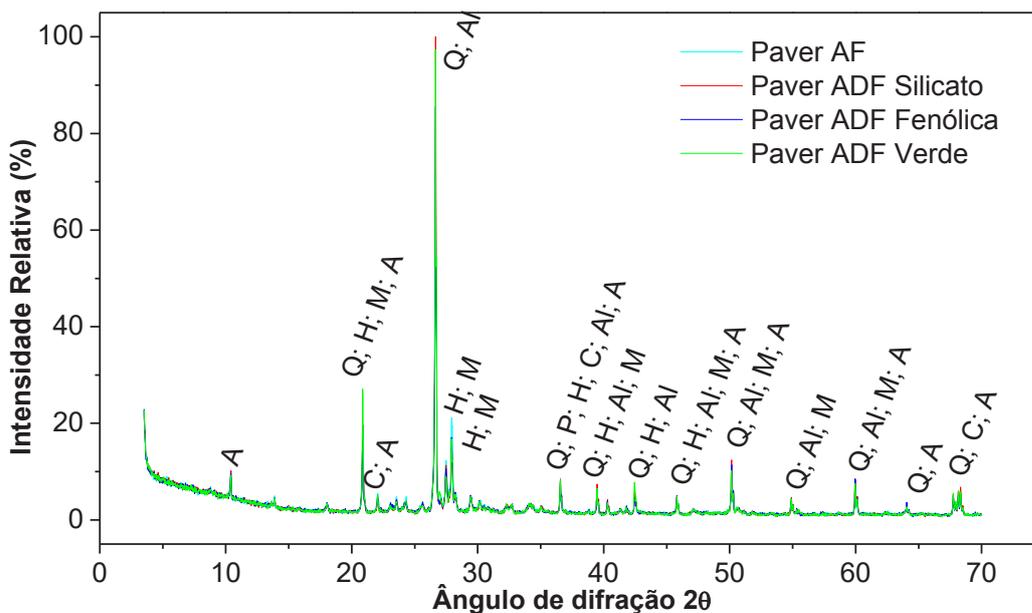
4.2 AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Nos subitens 4.2.1 a 4.2.8 foram reportados os resultados dos ensaios realizados com os pavimentos fabricados com as ADFs e o pavimento padrão com AF.

4.2.1 Análise mineralógica por difração de raios X

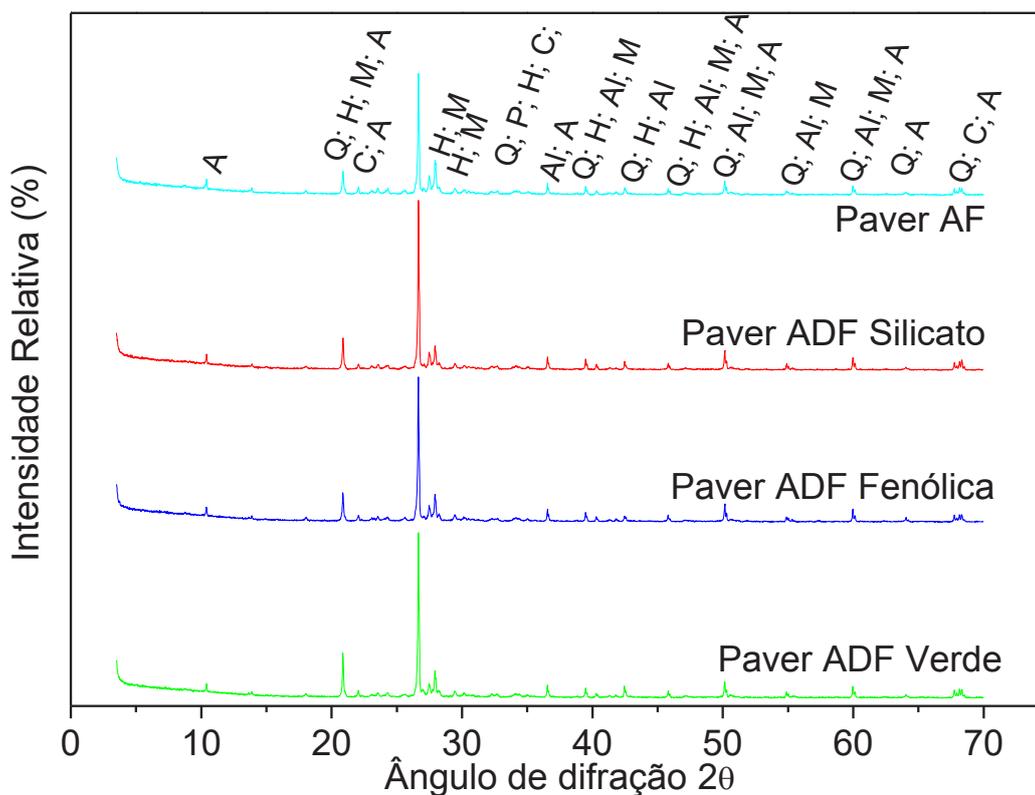
O difratograma de raios X e a interpretação da composição mineral presente na amostra de pavimentos fabricados com AF estão apresentados nas FIGURA 4.12 e TABELA 4.8, respectivamente.

FIGURA 4.12 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DESLOCADOS DOS PAVIMENTOS COM ADFs E AF



FONTE: A autora (2017).

FIGURA 4.13 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DOS PAVIMENTOS COM ADFs E AF



FONTE: A autora (2017).

TABELA 4.8 - COMPOSIÇÃO MINERAL DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Código de Referência	Abreviatura	Nome do Composto	Fórmula Química
01-086-1560	Q	Quartzo	SiO ₂
01-073-9850	Al	Albita (Plagioclásio)	Na(AlSi ₃ O ₈)
01-084-0709	M	Microclínio (Feldspato alcalino)	KAlSi ₃ O ₈
01-087-0673	P	Portlandita	Ca(OH) ₂
01-085-1378	H	Hatrurita	Ca ₃ (SiO ₄)O
01-075-0923	C	Cristobalita	SiO ₂

FONTE: Software X'Pert High Score Plus (2011).

Os difratogramas obtidos das quatro amostras de pavimentos apresentaram picos similares, com estruturas semelhantes nas quatro amostras de pavimentos analisadas. Devido à altura e constância da linha de base as estruturas presentes são caracterizadas como cristalinas e os compostos característicos de misturas cimentícias, como quartzo, portlandita, cristobalita, também encontrados por Basar e Aksoy (2012) em misturas de ADF em concreto.

4.2.2 Análise química por fluorescência de raios X

O resultado da análise química semiquantitativa realizada pelo ensaio de FRX dos pavimentos de concreto está apresentado na TABELA 4.9.

TABELA 4.9 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS - X DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

	Paver ADF Silicato (%)	Paver ADF Fenólica (%)	Paver ADF Verde (%)	Paver AF (%)
SiO₂	60,4	59,4	56,4	58,5
CaO	16,8	17,4	15,5	15,9
Al₂O₃	7,1	7,0	7,4	8,3
Fe₂O₃	4,0	3,9	4,1	4,7
K₂O	3,0	2,8	2,8	3,5
Na₂O	2,0	2,0	2,1	2,5
SO₃	0,9	0,9	0,8	0,8
MgO	0,8	0,9	0,8	0,8
TiO₂	0,5	0,5	0,4	0,5
MnO	0,1	0,1	0,1	0,1
ZrO₂	0,1	0,1	0,1	0,1
P₂O₅	0,1	0,1	0,1	0,1
SrO	0,1	0,1	0,1	0,1
Perda ao fogo	4,2	4,8	9,3	4,2

FONTE: A autora (2017).

Dos resultados, observou-se semelhança entre os óxidos mais estáveis presentes nos pavimentos e suas proporções, provavelmente devido à composição do cimento e dos agregados adicionados no processo de fabricação, não influenciando significativamente na composição de cada uma das ADFs, já que todos os traços possuem a mesma quantidade de AF substituída (12%).

4.2.3 Inspeção visual

A inspeção visual dos pavimentos foi realizada com 28 dias de idade de fabricação das amostras de pavimento. A FIGURA 4.14 a FIGURA 4.17 mostram os corpos de prova analisados para a inspeção visual.

FIGURA 4.14 - RUGOSIDADES NAS AMOSTRAS DE PAVER AF



FONTE: A autora (2017).

FIGURA 4.15 - RUGOSIDADES NAS AMOSTRAS DE PAVER ADF SILICATO



FONTE: A autora (2017).

FIGURA 4.16 - RUGOSIDADES NAS AMOSTRAS DE PAVER ADF FENÓLICA



FONTE: A autora (2017).

FIGURA 4.17 - RUGOSIDADES NAS AMOSTRAS DE PAVER ADF VERDE



FONTE: A autora (2017).

Percebeu-se das FIGURA 4.14 a FIGURA 4.17, um acabamento mais homogêneo nas peças de pavimentos de ADF Fenólica e ADF Verde. E as peças de ADF Silicato e AF apresentaram mais rebarbas e mais discontinuidades na superfície do pavimento. A diferença no acabamento pode ser atribuída a ajustes da vibroprensa, compactando mais uniformemente as peças dos lotes de ADF Fenólica e ADF Verde. Além disso, durante a moldagem outro fator que pode ter influenciado no acabamento das peças foi fator a/c. Principalmente o pavimento fabricado com

ADF Verde, que possuiu o menor fator de a/c, apresentou melhor acabamento, possivelmente devido a menor presença de poros e descontinuidades em relação às demais peças que apresentaram maior fator a/c durante a mistura.

FIGURA 4.18 - CORPOS DE PROVA NA INSPEÇÃO VISUAL: ADF SILICATO, ADF FENÓLICA, ADF VERDE E AF



FONTE: A autora (2017).

4.2.4 Análise dimensional

Os resultados análise dimensional para os lotes de pavimentos com ADF Silicato, ADF Fenólica, ADF Verde e AF são apresentados na TABELA 4.10.

TABELA 4.10 - ANÁLISE DIMENSIONAL DOS PAVIMENTOS

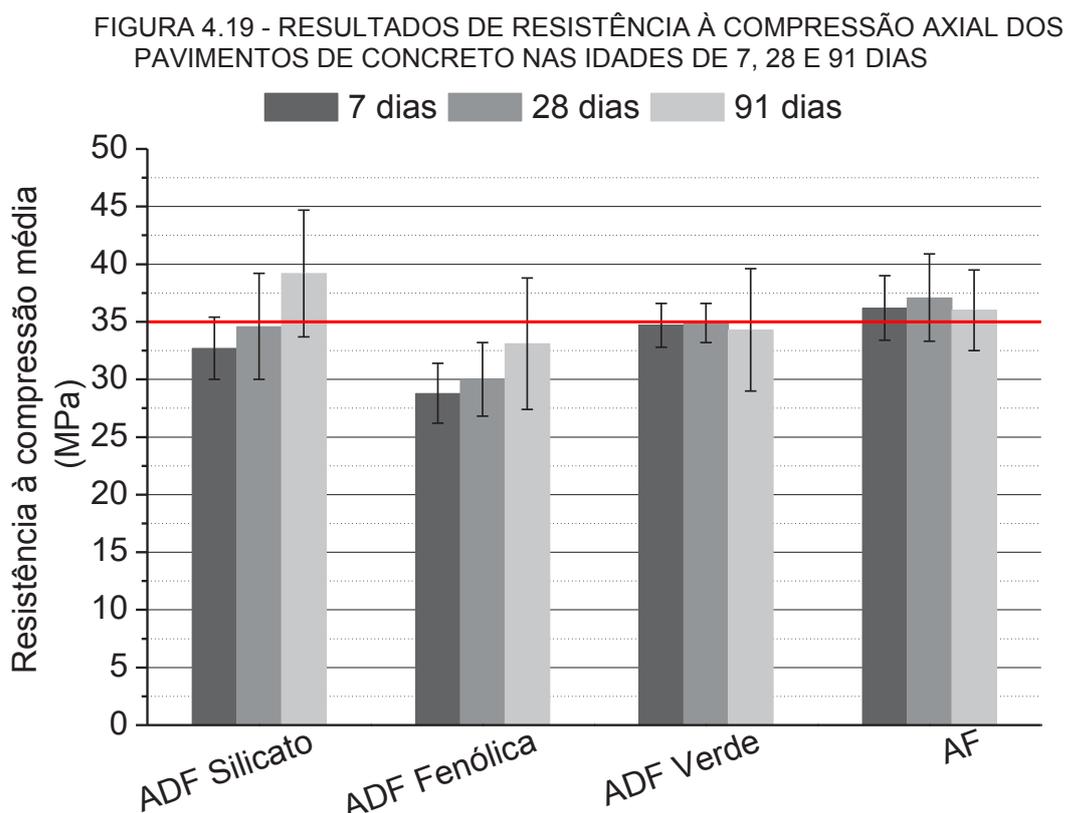
Amostra	Comprimento médio (mm)	Largura média (mm)	Espessura média (mm)
ADF Silicato	202,2	99,7	61,5
ADF Fenólica	202,0	99,8	62,5
ADF Verde	202,3	99,7	62,8
AF	202,5	100,7	62,2

FONTE: A autora (2017).

Avaliando os resultados de análise dimensional para os pavimentos de concreto de (200x100x60) mm, todos os traços obtiveram valores dentro dos limites de tolerância de ± 3 mm, estando, portanto, de acordo com o exigido pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

4.2.5 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em três idades para cada um dos lotes de pavimentos. Os resultados obtidos de resistência à compressão média, juntamente com os desvios padrão das medidas, são apresentados na FIGURA 4.19.



FONTE: A autora (2017).

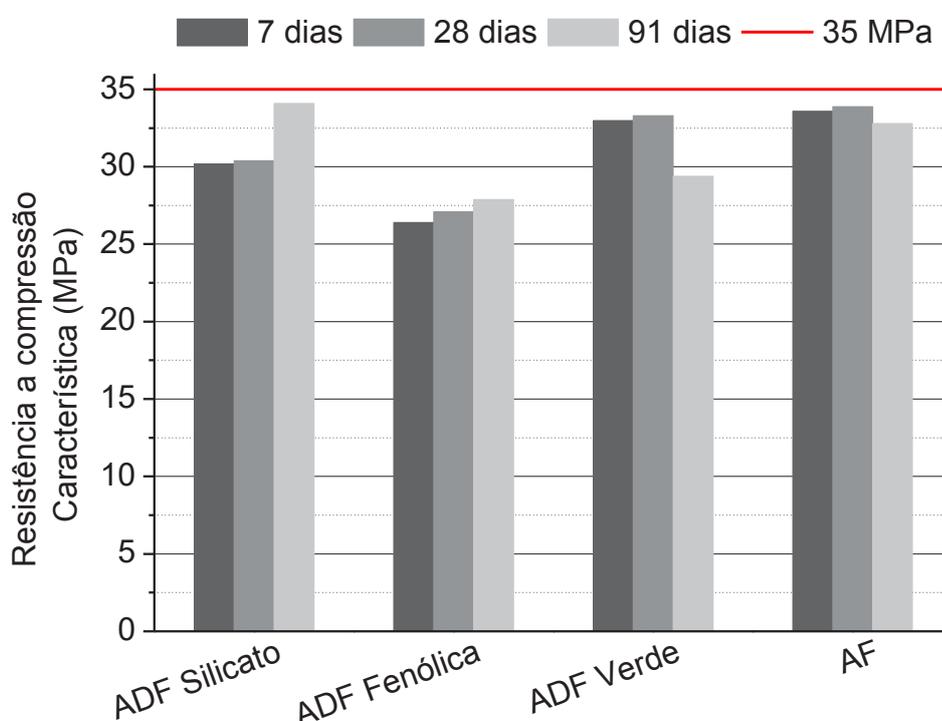
A tendência observada é de aumento da resistência média com a idade das peças, como é evidenciado na FIGURA 4.19, decorrente do processo natural de hidratação do cimento e conformação do material. Eventuais desvios na tendência do ensaio podem estar relacionados às imperfeições na prensa e distribuição nas peças escolhidas para o ensaio.

Observou-se, ainda, da FIGURA 4.19, um aumento de 13,3% na resistência à compressão dos corpos de prova fabricados com ADF Silicato da idade de 28 para 91 dias. Tal aumento pode ter sido favorecido por uma hidratação mais acelerada dos minerais contidos na mistura cimentícia, do que o processo que ocorreu nos primeiros 28 dias, provocando essa elevação na resistência da amostra.

Os resultados foram avaliados estatisticamente pelo teste de Tukey, sendo considerada significativa a variação apenas para a compressão na primeira idade de 7 dias para a amostra de ADF Fenólica em relação às demais, para um intervalo de confiança de 95%. Portanto, não se constatou diferença significativa entre as amostras, sendo aplicáveis as ADFs na substituição da AF para a fabricação de pavimentos intertravados.

Na FIGURA 4.20 estão apresentados os resultados de resistência à compressão característica, obtidos pela Equação 3.1 que, conforme estabelecido pela NBR 9781 (ABNT, 2013), fixa como requisito para a aceitação técnica do pavimento, possuir resistência à compressão igual ou superior a 35 MPa. Da FIGURA 4.20 observou-se que os valores de resistência característica não alcançaram o requisito da norma que exige $f_{pk\ est} \geq 35$ MPa. No entanto, os valores de resistência característica de 28 dias ficaram muito próximos, tanto para a AF, quanto para a ADF Verde, sendo esta uma boa matéria prima para a aplicação em pavimentos de concreto.

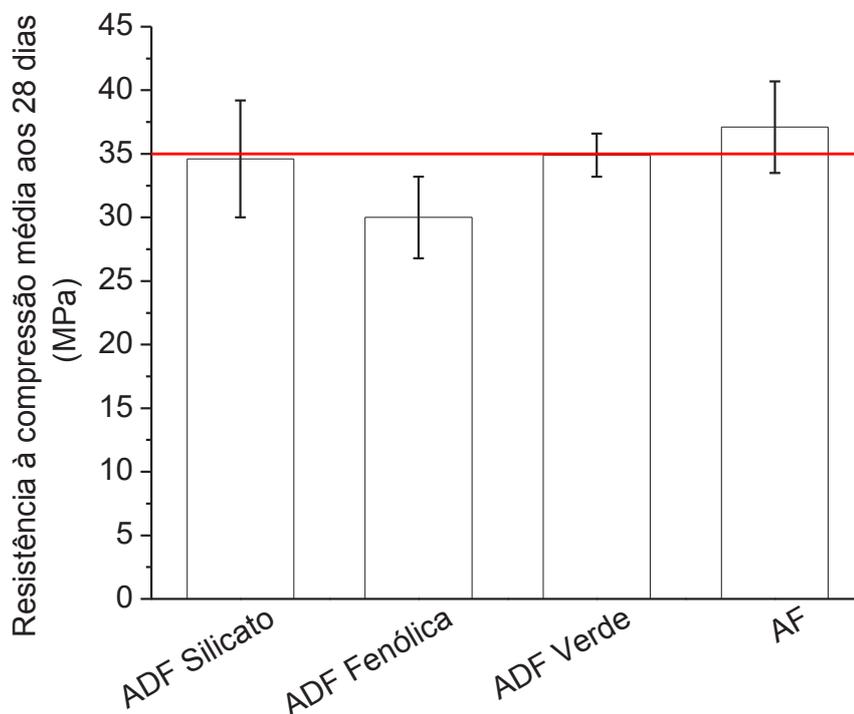
FIGURA 4.20 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO CARACTERÍSTICA DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO NAS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS



FONTE: A autora (2017).

Na FIGURA 4.21 estão mostrados os dados específicos da idade de 28 dias das peças fabricadas. Os valores médios de resistência a compressão das peças fabricadas com ADF substituindo parte da AF ficaram abaixo dos 35 MPa, porém próximos para a ADF Silicato e ADF Verde, com 34,6 e 34,9 MPa, respectivamente, enquanto que a resistência média a compressão do traço contendo AF ficou em 37,1 MPa. Os limites dos pontos na FIGURA 4.20 foram calculados conforme Equação 3.2.

FIGURA 4.21 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÉDIA A COMPRESSÃO AOS 28 DIAS



FONTE: A autora (2017).

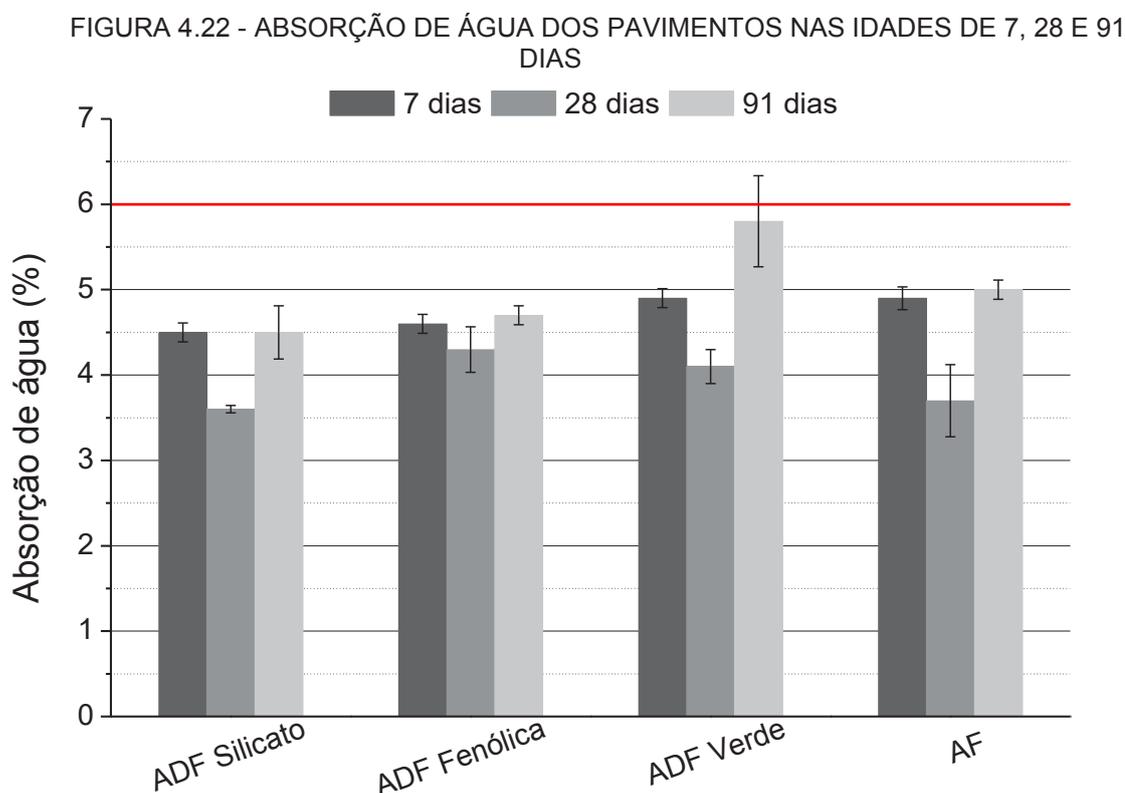
Em comparação com estudos similares, Carnin *et al.* (2010) obtiveram 35,91 MPa de resistência característica aos 45 dias de cura, enquanto Watanabe (2004) obteve 32,23 MPa de resistência média aos 30 dias de cura, ambos utilizando ADF Verde. Da literatura, ainda, Basar e Aksoy (2012) afirmam que as misturas de concreto contendo ADFs geralmente exibem, em todas as idades, menor resistência à compressão quando comparados às misturas convencionais (KHATIB e ELLIS, 2001; SIDDIQUE *et al.*, 2011; MONOSI, SANI e TITTARELLI, 2010; KHATIB *et al.*, 2010). Segundo os autores, a resistência à compressão reduz pela existência dos aglomerantes nos grãos do agregado miúdo, o qual dificulta as ligações entre a

pasta cimentícia e os agregados, impedindo o contato e a aderência entre estes, que contribui com o aumento da resistência das peças (BASAR e AKSOY, 2012).

Da FIGURA 4.21, ainda, é possível verificar que os dados de resistência à compressão do lote de ADF Verde apresentaram menor desvio padrão, na ordem de 1,7 MPa, em relação aos outros três traços, na ordem de 3 a 5 MPa.

4.2.6 Absorção de água

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água nas peças de pavimento intertravado são apresentados na FIGURA 4.22. São apresentados para cada um dos quatro lotes e nas três idades de 7, 28 e 91 dias.



FONTE: A autora (2017).

A partir dos resultados, observou-se que os valores de absorção de água foram maiores na idade de 7 dias e decaíram na idade de 28 dias, sendo que as maiores variações foram para AF e ADF Silicato, com 24,5% e 20,0% respectivamente, de redução na absorção de água de 7 para 28 dias. Na idade de 91 dias, verificou-se, conforme apresentado na FIGURA 4.22, o aumento na absorção de água de todos os traços. A tendência de aumento da absorção de água

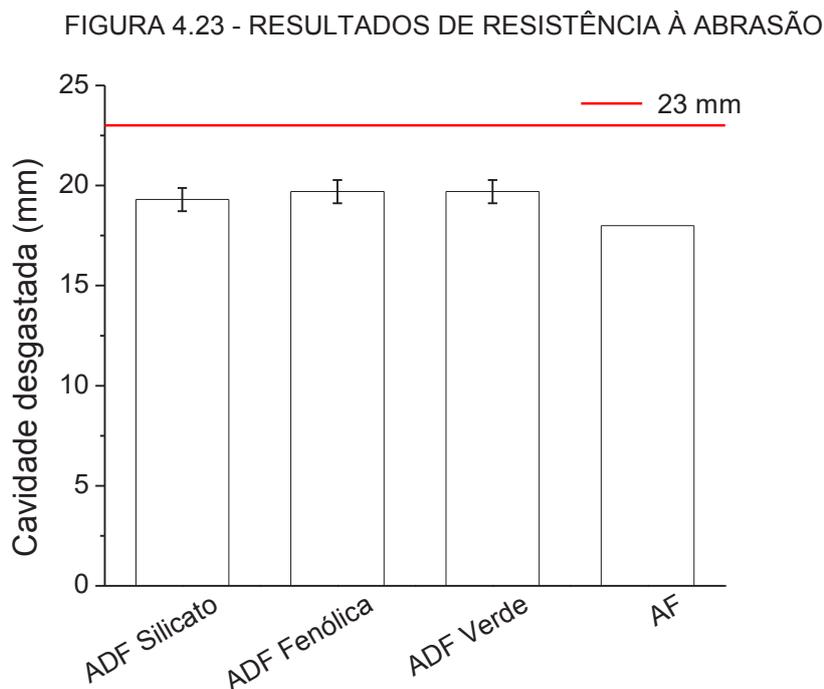
com o aumento da idade das amostras de concreto também foi verificada por Guney *et al.* (2010), em seu estudo com ADF Verde em teores de substituição em concreto que variavam de 0 a 15%.

Os resultados foram avaliados estatisticamente pelo teste de Tukey, sendo considerada significativa a variação na absorção de água entre os pavers de ADF Silicato com ADF Verde e ADF Silicato com AF na primeira idade, de 7 dias, para um intervalo de confiança de 95%. Na idade de 28 dias, não foi constada diferença significativa entre as amostras. Na idade de 91 dias, as amostras de ADF Verde obtiveram resultados significativamente distintos das demais amostras. Tendência que pode ser explicada pela maior absorção do agregado de ADF Verde em relação às demais amostras.

Apesar das pequenas diferenças entre as amostras, o valor de absorção de água fixado pela norma 9781 (ABNT, 2013) inferior a 6%, desse modo, todos os valores obtidos no ensaio estão de acordo com o limite exigido.

4.2.7 Resistência à abrasão

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à abrasão e os desvios das amostras são apresentados na FIGURA 4.23.



FONTE: A autora (2017).

Para efeito de norma NBR 9781 (ABNT, 2013) os quatro traços obtiveram cavidade desgastada no ensaio de abrasão inferior a 23 mm, portanto, de acordo com o requisito de norma técnica. Quanto aos desvios, os três corpos de prova fabricados com ADFs apresentaram o mesmo desvio de 0,57 mm, enquanto que o desvio para os pavers fabricados com AF foi de 0 mm.

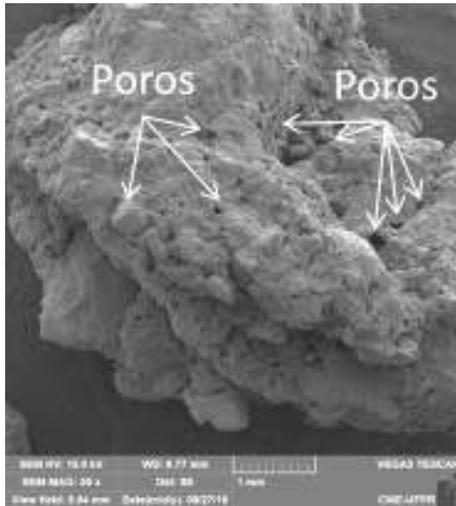
A partir da análise de variância realizada utilizando teste de Tukey, não foi verificada diferença significativa entre os pavers fabricados com ADF, porém, relacionando os pavimentos de ADFs e de AF, o teste revelou que são significativamente diferentes, pelo fato das ADFs apresentarem desvio entre as amostras e a AF não. Apesar disso, os resultados obtidos estão de acordo com a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), sendo as três ADFs com 12% de substituição aplicáveis no traço fabricado, segundo o ensaio de resistência à abrasão normatizado.

Singh e Siddique (2012) avaliaram o efeito da abrasão em corpos de prova de concreto e verificaram que com o aumento do teor de substituição de ADF ou com o aumento da idade do corpo de prova, a resistência à abrasão aumentava, indicando que as ADFs, com sua menor granulometria em relação às areias naturais, conferem à peça de concreto maior resistência à abrasão, devido ao melhor preenchimento da massa cimentícia. Pelos resultados obtidos, pode se considerar que não houve diferença significativa quanto ao tamanho dos grãos ou aglomerante contido nas ADFs.

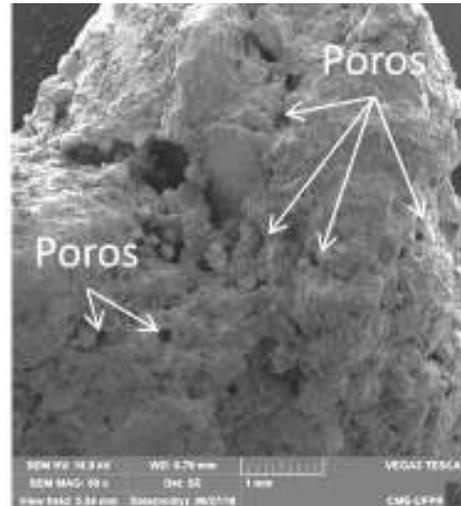
4.2.8 Microscopia eletrônica de varredura com análise química elementar

As micrografias das amostras de pavimentos fabricados com a AF e com cada uma das ADFs com idades de 89 e 194 dias são apresentadas nas FIGURA 4.24 a FIGURA 4.28.

FIGURA 4.24 - MICROGRAFIAS DE MEV DOS PAVIMENTOS COM IDADE DE 89 DIAS A MAGNIFICAÇÃO DE 50X



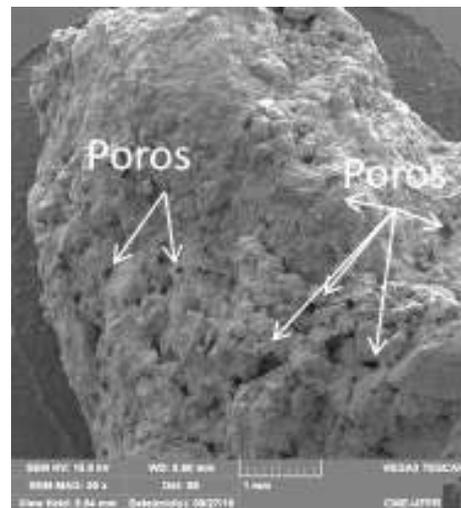
(a) AF 50x



(b) ADF Silicato 50x



(c) ADF Fenólica 50x



(d) ADF Verde 50x

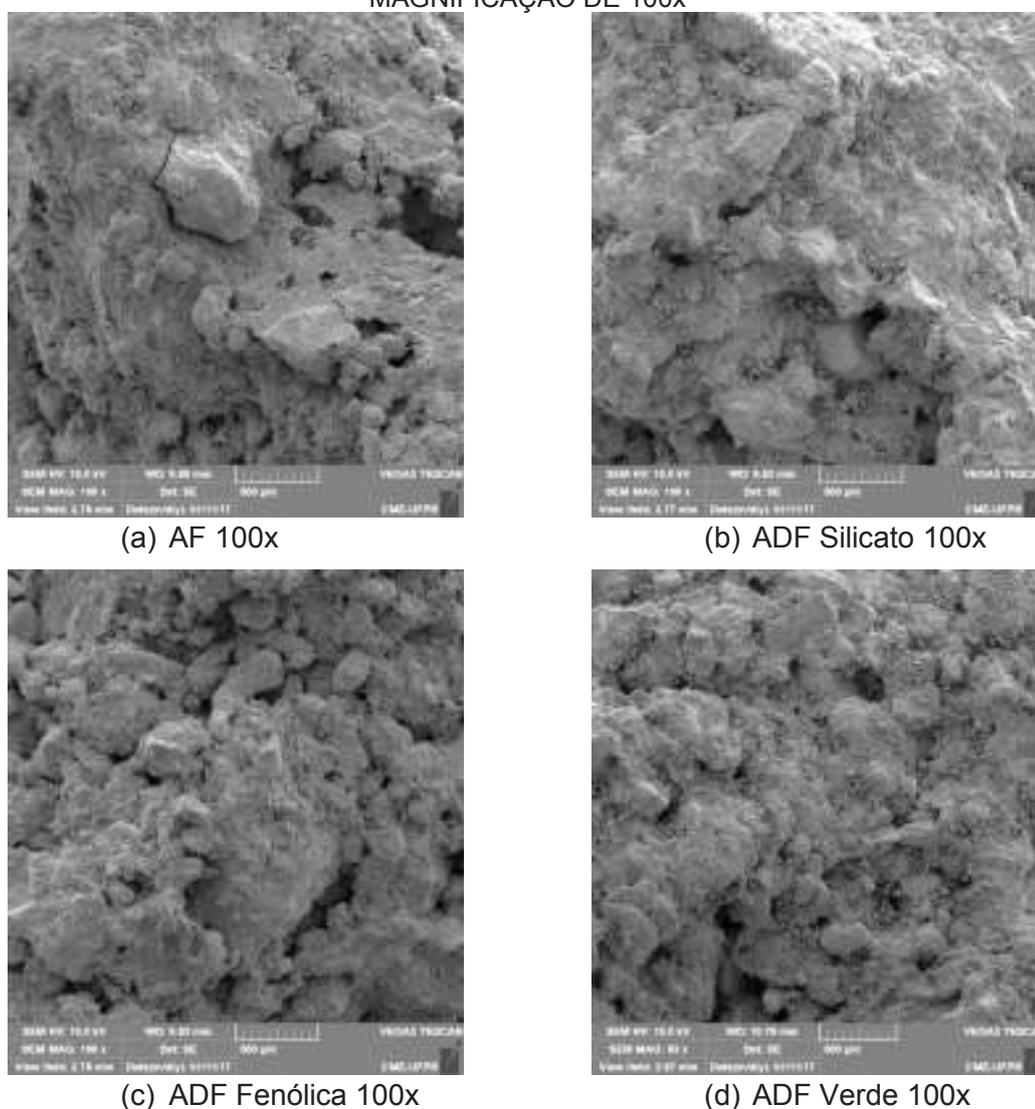
FONTE: A autora (2017).

Da FIGURA 4.24, com peças em 89 dias de cura, observou-se em todas as imagens uma mistura não homogênea, com regiões alternadas de alta densidade e porosidade, distribuídos nas amostras, sendo mais evidentes na amostra de ADF Fenólica. Nas imagens observou-se porosidade muito similar nas peças. Isso significa que a substituição dos agregados pode não ter influenciado significativamente na morfologia das peças, possivelmente pela proximidade da granulometria, baixa proporção de substituição e/ou compostos presentes nos agregados.

Já na FIGURA 4.25, com amostras de 194 dias de cura, observa-se que a tendência de mistura não homogênea, com fragmentos arredondados que

aparentam ser o agregado miúdo, continua evidente nas amostras de paver, principalmente na amostra fabricada com ADF Fenólica. O não desenvolvimento da massa cimentícia ao redor dos agregados pode estar relacionado com a resistência à compressão axial discretamente menor obtida nos pavers de ADF Fenólica em relação aos demais pavimentos. A ausência ou má formação da zona de transição entre pasta e agregado compromete as propriedades do concreto endurecido, podendo reduzir a resistência e, portanto a durabilidade da peça de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

FIGURA 4.25 - MICROGRAFIAS DE MEV DOS PAVIMENTOS COM IDADE DE 194 DIAS A MAGNIFICAÇÃO DE 100x



FONTE: A autora (2017).

As imagens obtidas pela análise de microscopia eletrônica de varredura (FIGURA 4.26) evidenciaram algumas estruturas características da massa

cimentícia, como etringitas dispersas, C-S-H e portlanditas, em caráter amorfo e cristalino.

FIGURA 4.26 - MICROGRAFIAS DE MEV DOS PAVIMENTOS COM IDADE DE 194 DIAS A MAGNIFICAÇÃO DE 5000x



(a) AF 5.000x



(b) ADF Silicato 5.000x



(c) ADF Fenólica 5.000x



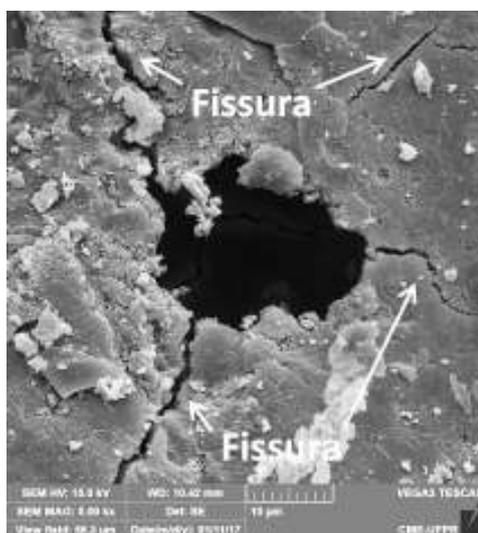
(d) ADF Verde 5.000x

FONTE: A autora (2017).

A superfície analisada no MEV em todas as amostras foi uma superfície de fratura, portanto fragilizada, podendo não representar a amostra como um todo. Mas foi possível verificar (FIGURA 4.27) pontos de encontro de fissuras nas amostras de pavimento de ADF Silicato e ADF Fenólica. Essa ocorrência é uma das características de identificação de reação álcali-agregado, denominada fissuração em mapa, que pode ser causada pela formação de produtos expansivos na

presença de umidade, gerando tensões trativas internas e fissurações, que podem comprometer as estruturas de concreto (HASPARYK, 2005).

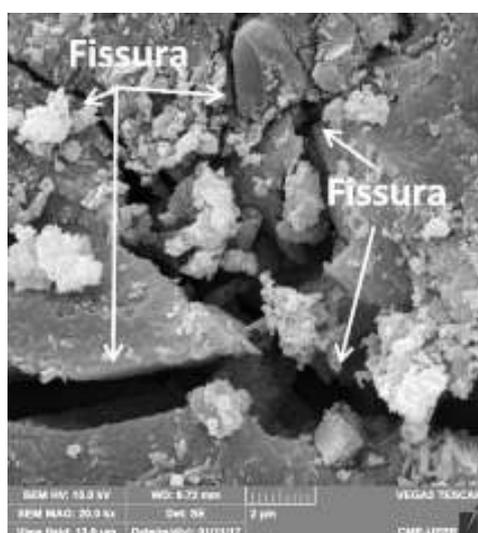
FIGURA 4.27 - MICROGRAFIAS DE MEV DOS PAVIMENTOS ADF SILICATO E ADF FENÓLICA COM EVIDÊNCIAS DE RAA



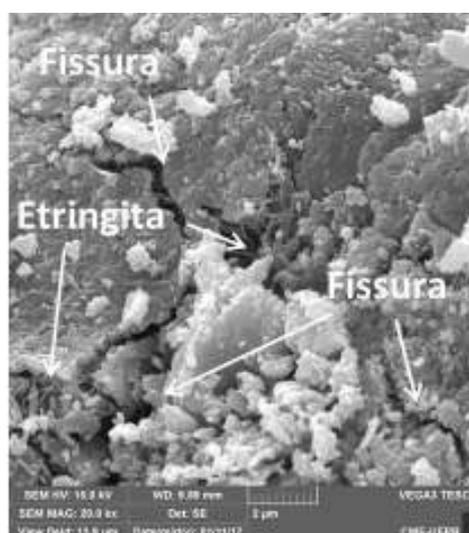
(a) ADF Fenólica 5.000x



(b) ADF Fenólica
Região destacada (a) em 20.000x



(c) ADF Silicato 20.000x



(d) ADF Silicato 20.000x

FONTE: A autora (2017).

Com o intuito de analisar a morfologia de poros em cada uma das amostras, foram obtidas as imagens apresentadas na FIGURA 4.28. Em todas as amostras foram observadas estruturas comuns à massa cimentícia, como C-S-H, portlanditas e etringitas. Não foram verificadas estruturas de subprodutos de reações de

deterioração do concreto nos poros de AF (FIGURA 4.28 (a)), ADF Silicato (FIGURA 4.28 (b)) e ADF Verde (FIGURA 4.28 (d)). No entanto, no poro de ADF Fenólica, FIGURA 4.28 (c) foram observados alguns cristais com morfologia similar à etringitas e microtrincas no interior do poro podendo indicar a deterioração da matriz cimentícia. Nas demais amostras não foram identificadas ocorrência dos típicos produtos de deterioração do concreto, como grandes concentrações de agulhas e rosáceas de etringita e monossulfato (HASPARYK, 2005).

FIGURA 4.28 - MICROGRAFIAS DE MEV DE POROS NOS PAVIMENTOS COM IDADE DE 194 DIAS



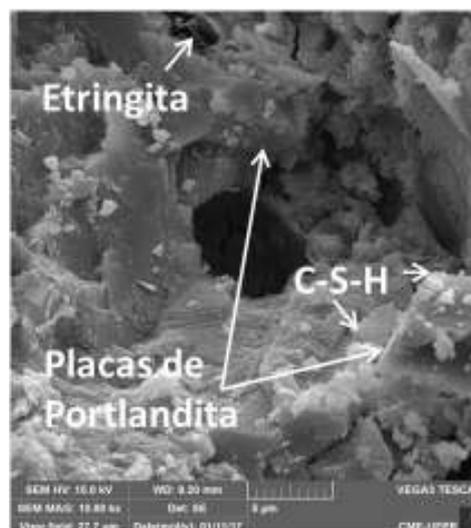
(e) AF 20.000x



(f) ADF Silicato 20.000x



(g) ADF Fenólica 20.000x



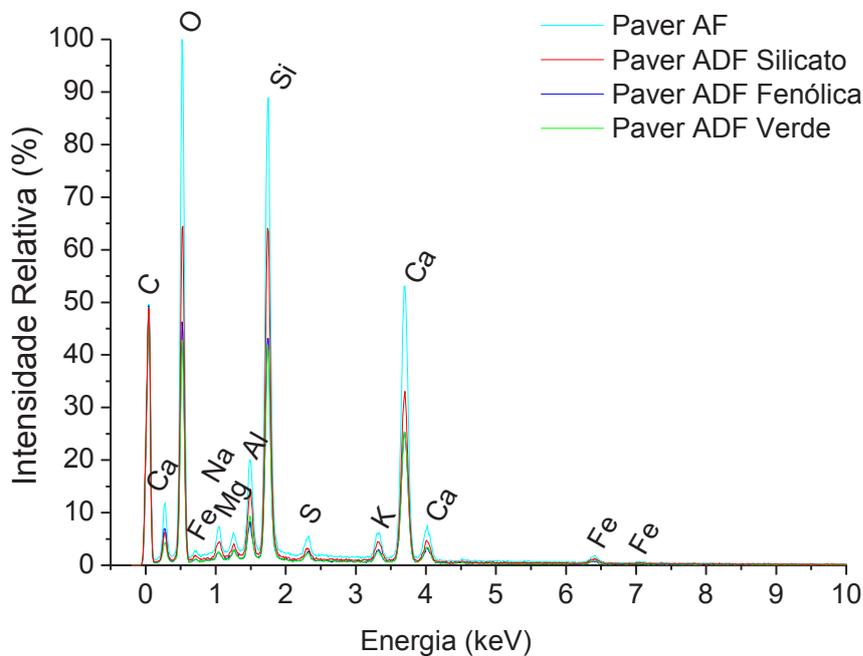
(h) ADF Verde 10.000x

FONTE: A autora (2017).

Complementando as micrografias de MEV, foram obtidas as composições elementares das peças de pavimento fabricadas utilizando a técnica de

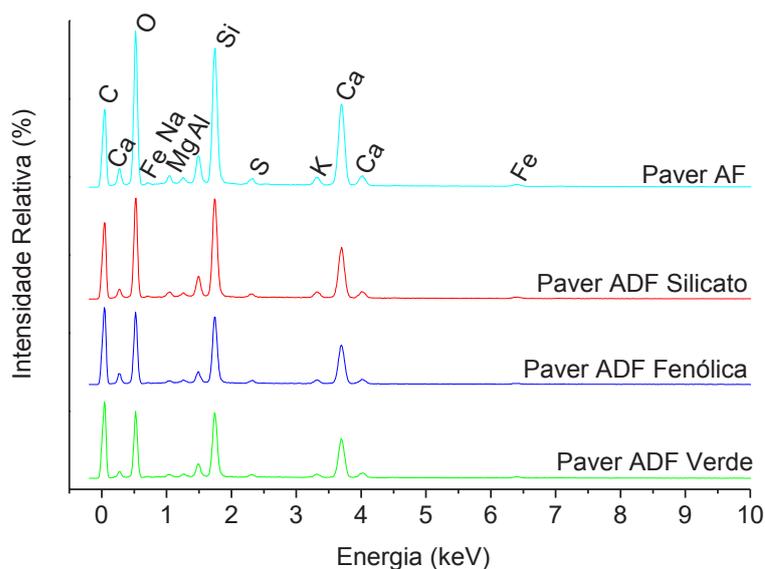
espectroscopia por dispersão de energia. Os espectros obtidos são apresentados nas FIGURA 4.29 e FIGURA 4.30.

FIGURA 4.29 - ESPECTROS DE DISPERSÃO DE ENERGIA COM INTENSIDADES RELATIVAS E SOBREPOSTOS DAS AMOSTRAS DE PAVIMENTO INTERTRAVADO FABRICADAS COM IDADE DE 89 DIAS



FONTE: A autora (2017).

FIGURA 4.30 – ESPECTROS DE DISPERSÃO DE ENERGIA DESLOCADOS DAS AMOSTRAS DE PAVIMENTO INTERTRAVADO FABRICADAS COM IDADE DE 89 DIAS



FONTE: A autora (2017).

Das peças de pavimento, percebeu-se similaridade dos espectros, revelando a presença dos mesmos picos em todas as amostras, no entanto, com intensidades

elementares diferentes. Se tratando de uma análise semiquantitativa, observou-se semelhança entre as proporções obtidas das análises químicas de FRX da TABELA 4.9, contendo Si e O, em todas as amostras, seguido de Ca, Al, K, Mg, Na, presentes nos quatro traços devido à composição cimentícia, não apresentando divergências quanto aos elementos disponíveis na amostra controle e na argamassa com ADF, conforme também foi verificado por Basar e Aksoy (2012).

4.2.9 Ensaios de lixiviação

As concentrações dos analitos obtidas por meio do ensaio de lixiviação realizado nos pavimentos de concreto fabricados são mostradas na TABELA 4.11.

TABELA 4.11 - RESULTADOS PARA EXTRATO LIXIVIADO DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Parâmetro	Concentração Lixiviada Paver Silicato (ppm)	Concentração Lixiviada Paver Fenólica (ppm)	Concentração Lixiviada Paver Verde (ppm)	Limite máximo no extrato (ppm) NBR 10.004:2004 Anexo H
Arsênio	< 0,010	< 0,010	< 0,010	1,000
Bário	0,9841	0,9252	1,0104	70,00
Cádmio	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,5000
Chumbo	< 0,020	< 0,020	< 0,020	1,000
Cromo total	0,0976	0,1627	0,1525	5,000
Fluoreto	1,100	0,200	1,200	150,0
Mercúrio	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,1000
Prata	< 0,100	< 0,100	< 0,100	5,000
Selênio	< 0,100	< 0,100	< 0,100	1,000

FONTE: A autora (2017).

Dos resultados obtidos, observou-se que para o Chumbo, na ADF Silicato, houve uma redução da concentração lixiviada para o pavimento fabricado com o mesmo agregado, podendo caracterizar a retenção deste analito na estrutura do pavimento. Apesar do aumento na lixiviação de alguns analitos das amostras de ADF para as amostras de pavimentos, os valores de concentração nos extratos lixiviados de todas as amostras estão abaixo do máximo definido por norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

4.2.10 Ensaios de solubilização

Os resultados do ensaio de solubilização realizados nos pavimentos de concreto fabricados são mostrados na TABELA 4.12.

TABELA 4.12 - RESULTADOS PARA EXTRATO SOLUBILIZADO DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Parâmetro	Concentração Solubilizada Paver Silicato (ppm)	Concentração Solubilizada Paver Fenólica (ppm)	Concentração Solubilizada Paver Verde (ppm)	Limite máximo no extrato (ppm) NBR 10.004:2004 Anexo G
Alumínio	0,1502	0,0679	0,1299	0,200
Arsênio	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020	0,010
Bário	0,8520	0,9895	0,9537	0,700
Cádmio	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,005
Chumbo	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,010
Cianeto	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,070
Cloreto	1,0536	2,1222	2,1677	250,0
Cobre	0,026	0,0378	0,0292	2,0
Cromo total	0,0382	0,0331	0,0322	0,050
Fenóis Totais	0,002	1,248	< 0,002	0,010
Ferro	< 0,100	< 0,100	< 0,100	0,300
Fluoreto	1,054	0,396	0,417	1,500
Manganês	< 0,100	< 0,100	< 0,100	0,100
Mercúrio	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,001
Nitrato	0,343	0,897	2,476	10,0
Prata	< 0,020	< 0,020	< 0,020	0,050
Selênio	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020	0,010
Sódio	172,936	91,325	101,067	200,0
Sulfato	24,308	27,719	25,658	250,0
Zinco	< 0,100	< 0,100	< 0,100	5,0

FONTE: A autora (2017).

Das concentrações do extrato solubilizado para os pavimentos de concreto, verificou-se que os resultados para Bário foram maiores que os dos extratos solubilizados das ADFs (TABELA 4.7), possivelmente o analito seja proveniente dos agregados, cimento, aditivo ou água empregados no processo de fabricação dos pavimentos. Fato também verificado por Naik, Singh e Ramme (2001), no qual a

concentração de bário no extrato seguia próximo do traço controle, não alterando significativamente com o aumento de proporção de ADF adicionada na argamassa.

Os valores para alumínio, cianeto, ferro, nitrato e sódio houve a redução das concentrações solubilizadas para o pavimento fabricado com o mesmo agregado, podendo também caracterizar a retenção destes analitos na estrutura do pavimento. As concentrações de fenóis totais, por ainda constatar presença no extrato solubilizado das peças fabricadas com ADF Fenólica, com 1,248 ppm, sugere-se que não seja aplicado em pavimentos, pois com a exposição a intempéries, estará solubilizando tal composto acima do valor fixado por NBR 10.004 (ABNT, 2004) de 0,010 ppm.

Em contrapartida, a partir dos resultados de solubilização das peças de pavimento, observou-se que é possível, ambientalmente, a utilização da ADF Verde e ADF Silicato como substituinte parcial de agregados miúdos na produção de pavimentos de concreto, pois os resultados dos ensaios ambientais indicaram que estes resíduos estão de acordo com as exigências estabelecidas na NBR 10.004 (ABNT, 2004) para a lixiviação e solubilização dos contaminantes presentes.

5 CONCLUSÕES

A utilização de resíduos na construção civil é uma opção para a destinação alternativa de materiais que possuem propriedades aceitáveis para serem empregados em outros processos. No entanto, além dos requisitos técnicos obrigatórios avaliados pela NBR 9781 (ABNT, 2013), considera-se importante verificar a durabilidade do produto final obtido. A relevância disso está em não apenas destinar um resíduo a uma aplicação mais nobre, mas também, reduzir os custos e recursos naturais em possíveis manutenções corretivas.

Além disso, o estudo específico para cada resíduo também é essencial, já que cada um é proveniente de uma fonte particular, contêm características peculiares e devem ser minuciosamente avaliadas antes aplicação para produção em larga escala.

Deste estudo foi possível caracterizar as ADFs e a AF aplicadas na fabricação de pavimentos de concreto. As características de composição minerais, químicas, de massa específica e absorção de água dentro dos valores já verificados na literatura. Foram caracterizadas como Resíduo Não Perigoso e Não Inerte - Classe II – A, podendo ser aplicadas como reciclagem externa.

Dos resultados obtidos nos ensaios ambientais verifica-se que é possível a utilização da ADF Verde e ADF Silicato como substituinte parcial de agregados miúdos na produção de pavimentos de concreto, pois estes apresentaram lixiviação e solubilização de analitos menor que as concentrações máximas estabelecidas na NBR 10.004 (ABNT, 2004). Quanto a ADF Fenólica, considerou-se que não esteja ambientalmente apta a ser aplicada na mesma porcentagem de substituição a AF em pavimentos empregada neste estudo, de 12%, pois a quantidade de fenóis totais no extrato solubilizado do paver fabricado com ADF Fenólica foi superior ao máximo estabelecido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Dos resultados do ensaio de reatividade álcali-agregado, constatou-se que, pela baixa suscetibilidade à reação álcali-sílica, a ADF Verde pode ser utilizada como substituinte total dos agregados miúdos em misturas de concreto. Porém, deve ser realizado novo estudo dos requisitos de NBR 9781 (ABNT, 2013), caso seja totalmente substituída.

Pelo ensaio de reação álcali-agregado, a ADF Silicato obteve alta suscetibilidade à reação, não sendo recomendada a substituição total dos

agregados miúdos pela ADF Silicato em misturas cimentícias. Corroborando com estes resultados, dos ensaios de MEV foram verificadas nas amostras de ADF Silicato e ADF Fenólica fissurações em mapa com proeminência de composto similar ao gel de RAA, devendo as aplicações destas ADFs serem minuciosamente estudadas em outros teores de substituição, verificando os reais efeitos causados pelos agregados substituídos na massa de concreto.

A partir dos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que, dentre as três ADFs estudadas, a ADF Verde é a melhor opção de substituição à AF, respeitando as exigências ambientais, pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), e os requisitos técnicos fixados pela NBR 9781 (ABNT, 2013), além de não apresentar suscetibilidade à RAA, conforme ensaio NBR 15.577 (ABNT, 2008).

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, para a melhoria da investigação das consequências técnicas e ambientais do uso de ADFs para a fabricação de pavimentos intertravados de concreto, sugere-se trabalhar com variações das quantidades de ADFs substituídos nos traços e, até mesmo com um traço de mistura entre as ADFs, a fim de analisar os efeitos quanto às proporções e o conjunto nas propriedades do material final e em suas características de lixiviação e aprisionamento de contaminantes. Ainda, nesses estudos, sugere-se que sejam realizadas análises de MEV em variadas idades, juntamente com as idades dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água, para verificar as características macro e microestruturais e suas possíveis relações.

Devido à concentração de fenóis totais solubilizada do pavimento intertravado fabricado com ADF Fenólica estar acima do limite máximo fixado pela norma vigente torna-se necessário investigar como a solubilização ocorre em traços com diferentes teores de substituição da ADF Fenólica, verificando a potencialidade de reutilização desta para este fim.

Do ponto de vista técnico, considerando os requisitos da NBR 9781 (ABNT, 2013), sugere-se que seja realizado um estudo da quantidade de ADF a ser substituída, objetivando o atendimento da exigência de resistência à compressão característica de 35 MPa aos 28 dias, já que nenhum dos traços atingiram este requisito de norma.

Finalmente, vale ressaltar também que existem variadas aplicações quando se refere a artefatos de concreto. Assim, pode ser cogitada a utilização das ADFs, logicamente avaliando os requisitos técnicos necessários, para a aplicação em blocos, por exemplo, já que normalmente estão mais protegidos de intempéries, lixiviando menos analitos do que no pavimento, podendo ser uma alternativa a destinação da ADF Fenólica estudada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABICHOU T.; BENSON C. H.; EDIL T. B. Foundry Green Sands as Hydraulic Barriers. Laboratory Study. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. p. 1175 a 1183. Dezembro, 2000.

ABCP. **Panorama do Mercado de Concreto**. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/files_mf/PanoramaMercadoConcretov2_Eliana-Taniguti.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2016.

ABIFA - Associação Brasileira de Fundição. **Manual de regeneração e reuso de areias de fundição**. São Paulo: Associação Brasileira de Fundição, 1999, p.1-49.

ABIFA - Associação Brasileira de Fundição). **Guia ABIFA de Fundição**. Anuário, 2013.

ABNT. (2001). NBR NM 30:2001. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Brasil.

ABNT. (2004). NBR 10004:2004. Resíduos sólidos – Classificação. Brasil.

ABNT. (2004). NBR 10005:2004. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Brasil.

ABNT. (2004). NBR 10006:2004. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Brasil.

ABNT. (2004). NBR 10007:2004. Amostragem de resíduos sólidos. Brasil.

ABNT. (2008). NBR 15577-4:2008. Agregados - Reatividade álcali-agregado: parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Brasil.

ABNT. (2009). NBR NM 52:2009. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Brasil.

ABNT. (2009). NBR 15702:2009. Areia descartada de fundição - Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Brasil.

ABNT. (2011). NBR 15984:2011. Areia descartada de fundição – Central de processamento, armazenamento e destinação (CPAD). Brasil.

ABNT. (2013). NBR 9781:2013. Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio. Brasil.

ADEGAS, R. G.. **Perfil ambiental dos processos de fundição ferrosa que utilizam areias no Estado do Rio Grande do Sul**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

AGGARWAL, Y.;SIDDIQUE, R. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. **Construction and Building Materials**. Volume 54, P. 210–223, 15 March 2014.

AZEVEDO, Maria da Conceição. **Directivas para a Concepção de Pavimentos: Critérios de Dimensionamento de Pavimentos.** Disponível em: <<http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgao>

Tcnica/DiretivasConstrucaoPavimentosCritériosDimensionamento.pdf>. Acesso em: 17 out. 2016.

ALVES, B. S. Q. **Estudo da viabilidade ambiental da reutilização das areias descartadas de fundição.** 2012. 239 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

ALVES, B. S. Q. DUNGAN, R. S. CARNIN, R. L. P. GALVEZ, R. PINTO, C. R. S. C. Metals in waste foundry sands evaluation of their leaching nad transport groundwater. **Water Air Soil Pollution**, p. 2-11, 30 abr. 2014.

BASAR, H. M. AKSOY, N. D. The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete. **Construction and Building Materials**. V. 35. P.508–515. May, 2012.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction And Building Materials**, Northern Ireland, v. 15, n. 1, p.93-103, 2001.

BONET, I. I. **Valorização do resíduo de areia de fundição (R.A.F.): incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q (concreto betuminoso usinado a quente).** In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003, Joinville. Anais. Joinville: Micro Service, 2003.

BONIN, A. L. ROSSINI, A. J. ZABIM, A. F. P. **Reutilização da Areia Preta de fundição em Construção Civil.** ABIFA. 1995.

BRAGANÇA, M. O. G. P. **Avaliação e monitoramento dos mecanismos de deterioração do concreto exposto aos íons cloreto e sulfato e o efeito da adição de nano-Fe₃O₄ por espectroscopia de impedância eletroquímica.** 2014. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BRASIL. **Decreto nº 1.413, de 31 de julho de 1975.** Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. Brasília, 14 ago 1975.

BRASIL. **Lei Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, 31 ago 1981.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil.** Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 02 ago 2010.

BRONDINO, O. C.; SILVA, J. P. G.; BRONDINO, N. C. M. **O Problema do Descarte da Areia de Fundição: Ensino para o Desenvolvimento Sustentável**. Trabalho apresentado em COBENGE Engenharia: Múltiplos saberes e atuações, Juiz de Fora, 2014.

BULLARD, J., JENNINGS, H., LIVINGSTON, R., NONAT, A., SCHERER, G., SCHWEITZER, J., *et al.* (2011). Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, 41, pp. 1208–1223.

CARNIN, R. L. P.; SILVA, C. O.; POZZI, R. J.; CARDOSO, D.; FOLGUERAS, M. V.; MALKOWSKI, W. Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. **Revista Pavimentação**, ANO V/Out/Nov/Dez de 2010, p.56 a 67.

CARNIN, R. L. P. *et al.* Use of an integrated approach to characterize the physicochemical properties of foundry green sands. **Thermochimica Acta**. Joinville, p. 150-155. 27 maio 2012.

CARNIN, R.L.P.; FARIAS, D. F. V.; ANDRADE, L.; FOLGUERAS, M. V. **Estudo da viabilidade do uso da areia descartada de fundição em assentamento e recobrimento de tubulações: monitoramento do trecho experimental do bairro Vila Nova**. Anais, ABES, 2013.

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C.. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, São Carlos, v. 57, n. 1, p.10-21, 2011.

CHANEY, R.L., CODLING, E.C., 2005. **Bio-based plant nutrient products: heavy metals considerations**. Proceedings of bio-based plant nutrient products workshop. In: Reynelles, R. (Ed.), Bio-based Plant Nutrient Products: Quality Assurance, Marketing and Regulations, pp. 22 e 36. Seattle, WA.

CHEGATTI, S. **Aplicação de resíduos de fundição em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas**. 2004. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CHEGATTI, S. **Areias Descartadas de Fundição: Contexto, gerenciamento e impacto**. Curitiba: Aprris Editora, 2016. 130 p.

CIMENTO ITAMBÉ. **Relatório de Ensaio**. Disponível em <<http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=368&chave=2015-13>> . Acesso em 28 nov 2016.

COELHO, F. S. *et al.* Óxidos de ferro e monazita de areias de praias do Espírito Santo. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p.233-237, 2005.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução 026**. SDS. Florianópolis: CONSEMA, 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decisão de diretoria N° 103/2007/C/E, de 22 de junho de 2007**. CETESB. São Paulo, 2007.

DUNGAN, R.S.; KUKIER, U.; LEE, B. Blending foundry sands with soil: Effect on dehydrogenase activity. **Science Of The Total Environment**, v. 357, n. 1-3, p. 221-230, 15 Mar, 2006.

FAGUNDES, A. B. VAZ, C. R. OLIVEIRA, I. L. KOVALESK, J. L. Caminhos para a sustentabilidade do setor de fundição no Brasil. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas** – Ano 5, nº 2, Abr-Jun/2010, p. 27-40.

FEAM. **Deliberação Normativa 192**. Belo Horizonte, MG, 2014.

FEPAM. **Diretriz Técnica 001**. Porto Alegre, RS, 2010.

FERREIRA, J. M. G. C. **Tecnologia da Fundição**. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 1999.

FREIRIA, R. C. Aspectos Históricos da Legislação Ambiental no Brasil: da ocupação e exploração territorial ao desafio da sustentabilidade. **História e Cultura**, Franca, v. 4, n. 3, p.157-179, dez. 2015.

GLASSER, F., MARCHAND, J., & SAMSOM, E. Durability of concrete - Degradation phenomena involving detrimental chemical reaction. **Cement and Concrete Research**, p. 226-246, set. 2008

GODINHO, D. P. **Pavimento Intertravado: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade**. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GOMES, L. P.; MORAES, C. A. M.; BOFF, R. D. Emprego de areia usada em Fundição em Coberturas Intermediária e Final de Aterros Sanitários de RSU. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.3, n.4, p. 71-76, abr.-jun. 2007.

GUERINO, K. B.; VICENZI, J.; BRAGANÇA, S. R.; BERGAMANN, C. P. Uso de Areia de Fundição como Matéria-prima para a Produção de Cerâmicas Brancas Triaxiais. **Cerâmica Industrial**, 15 (4) Julho/Agosto, 2010.

GUNEY, Y. *et al.* Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. **Waste Management**, [s.l.], v. 30, n. 8-9, p.1705-1713, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.018>.

GURUMOORTHY, N. ARUNACHALAM, K. Micro and mechanical behaviour of Treated Used Foundry Sand concrete. **Construction and Building Materials**. 123 (2016) 184–190. 11 jul 2016.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização do gel exsudado**. 2005. 326 p. Tese (doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2005.

HERMANN, M; REINERT, M. I.; DUARTE, I. R. **Processo Areia a Verde**. Blumenau: Nova Letra Gráfica e Editora, 2014. 306 p.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Portaria IAP Nº 224 DE 05/12/2007**. Curitiba, IAP, 2007.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Portaria IAP Nº 206 DE 31/10/2016**. Curitiba, IAP, 2016.

JI, S. WAN, L. FAN, Z. The toxic compounds and leaching characteristics of spent foundry sands. **Water Air and Soil Pollution** 2001;132:347–64.

KACHA, S.; NAKUM, A.; BHOGAYATA, A. Use of used Foundry Sand in Concrete: A State of Art Review. **International Journal of Research in Engineering and Technology**. P. 586 a 589. Volume: 03 Issue: 02 | Fevereiro, 2014.

KASHCHIEV, D.; VAN ROSMALEN, G. M.. Review: Nucleation in solutions revisited. **Crystal Research And Technology**, [s.l.], v. 38, n. 78, p.555-574, jul. 2003. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/crat.200310070>.

KHATIB J. M., ELLIS D. J. Mechanical properties of concrete containing foundry sand. **American Concrete Institute Spec Publications** 2001;SP-200:733–48.

KHATIB J. M, BAIG S., BOUGARA A., BOOTH C. **Foundry sand utilization in concrete production**. In: 2nd International conference on sustainable construction materials and technologies-Ancona, Italy; 2010.

KHATIB, J.M.. HERKI, B.A. KENAI, S. Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 867–871, jun, 2013.

KLINSKY, L. M. G.; FABBRI, G. T. P. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. **Revista Transportes**, v. XVII, n. 2, p. 36-45, 2009.

KLINSKY, L. M. G. **Avaliação do Reaproveitamento de Areia de Fundição Residual em camadas de Pavimentos**. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, 2013.

LINDSAY, B. J.; LOGAN, T. J. Agricultural Reuse of Foundry Sand. **Journal of Residuals Science & Technology**, Janeiro, 2005.

LOPES, L. R. N. **Avaliação da Redução dos Resíduos Sólidos de Areia Resinada em Fundição de Aço através de Recuperação Térmica**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2009.

MASTELLA, M. A. GISLON, E. S. PELISSER, F. RICKEN, C. SILVA, L. ANGIOLETTO, E. MONTEDO, O. R. K. Mechanical and toxicological evaluation of concrete artifacts containing waste foundry sand. **Waste Management**. V. 34. P. 1495–1500. February, 2014.

MEDEIROS, G. A.; BERGAMO, B.; TONELLO, P. S.; RIBEIRO, A. I. 2012. **Avaliação e Impactos Ambientais de uma Indústria de fundição na Região Metropolitana de Campinas**. Trabalho apresentado no III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Goiânia/GO, 2012.

MEDEIROS, B. L. **Estruturas subterrâneas de concreto: levantamento de manifestações patológicas na região metropolitana de Curitiba e análise de sistemas de reparo**. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. New York: Mcgraw-hill, 2008.

MEHTA, P. K., & GERWICK, B. (1982). Cracking-corrosion interaction in concrete exposed to marine environment [J]. **Concrete International**, 4(10), 45–51.

MONOSI S, SANI D, TITTARELLI F. Used foundry sand in cement mortars and concrete production. **Open Waste Manage J** 2010;3:18–25.

MIANOS. Produtos para fundição. **Certificado de análise química: Silicato de Sódio**. 31/01/16. Relatório Técnico.

MIGUEL, R.E. IPPOLITO J. A. LEYTEM A. B., PORTA, A. A. NORIEGA, R. B. B. DUNGAN, R. S. Analysis of total metals in waste molding and core sands from ferrous and non-ferrous foundries. **Journal of Environmental Management**, 110 (77-81). 26 Jun.2012

MIZUMOTO, C. **Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Testemunhos de Concreto e Agregados Constituintes**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MORE: **Mecanismo online para referências**, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: < <http://www.more.ufsc.br/> >. Acesso em: 23 out 2016.

MOREL, F.M.M. **Principles of Aquatic Chemistry**, Wiley-Interscience, New York, 1983.

NAIK, T. R. Singh, S. S. Ramme, B. W. Performance and leaching assessment of flowable slurry. **Journal of Environmental Engineering**. V. 127 (4). p. 359-368, 2001.

NAIK T.R., KRAUS R.N., CHUN Y.M., RAMME W.B., SINGH S.S. Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 2003; 15(4):400–7. Jul 2003.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.

NETTO, Rafael Mantuano. **Materiais Pozolânicos**. 2006. 149 f. Monografia (Especialização) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PEIXOTO, F.; GUESSER, W. L. **Reutilização de areia regenerada termicamente**. In: Congresso Nacional de Fundição, 2003, São Paulo. Trabalhos do CONAF, 2003.

PENKAITIS, G. **Impacto ambiental gerado pela disposição de areias de fundição: estudo de caso**. 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental (PROCAM), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PEREIRA, R. L.; CUNHA, C. J.; MATOSSO, N. P. MOMM, L. **Reaproveitamento do Resíduo de Areia a verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas**. Trabalho apresentado no 12º CONAF - Congresso de Fundição, São Paulo, 2005.

PINTO, F. B. **O uso de areia descartada de fundição (ADF) na produção de concreto**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

PORTLAND, **Associação Brasileira de Cimento. Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, São Paulo, 2010. 36p.

RAHIMI-AGHDAM, S.; BAŽANT, Z. P.; QOMI, M.J. A. Cement hydration from hours to centuries controlled by diffusion through barrier shells of C-S-H. **Journal Of The Mechanics And Physics Of Solids**, [s.l.], v. 99, p.211-224, fev. 2017. Elsevier BV.

RODRIGUES, P. P. F., **Parâmetros de dosagem do concreto**. 3.e.d. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998. 32p.

SANTOS, A. V.; RODRIGUES, A.; MARCHETTI, M. C.; CASARIN, V. A. **Reaproveitamento de areia de fundição descartada em substituição da areia natural na fabricação de blocos estruturais de concreto**. In: International Symposium Of Technological Innovation, 7., 2016, Aracaju. p. 541 - 546.

SARASWATI, P.; JAYKRUSHNA, R.; PALAS, S.; JAY, M. J., ANKIT, P. Application of Waste Foundry Sand for Evolution of Low-Cost Concrete. **International Journal of Engineering Trends and Technology**. Volume 4. Outubro, 2013.

SAWAI, H. *et al.* Decontamination of metal-contaminated waste foundry sands using an EDTA–NaOH–NH₃ washing solution. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 296, p.199-208, jul. 2016. Elsevier BV.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de Areia de Fundição através de Tratamento Químico via Processo Fenton**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química. Florianópolis, 2005.

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 7, p.651-665, jul. 2011. Elsevier BV.

SERAFIM, Marcos Antonio. **Estudo e proposição de formas de Pavers Intertravados para áreas e passeios públicos**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2010.

SHACKLETTE, H.T., BOERNGEN, J.G. **Element Concentrations in Soils and Other Surficial Materials of the Conterminous United States**. U.S. Geological Survey, Professions Paper 1270. U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC, 1984.

SI GROUP. **Technical Data Sheet**. 03/08/2015. Relatório Técnico.

SIDDIQUE, R. NOUMOWE, A. Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete. **Resources, Conservation and Recycling**. 53, 27–35. 8 nov 2008.

SIDDIQUE, R.; DE SCHUTTER, G.; NOUMOWE, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, 23, p.976 – 980, 2009.

SIDDIQUE, R., KAUR, G., RAJOR, A. Waste foundry sand and its leachate characteristics. **Resources, Conservation, and Recycling** 54, p.1027 e 1036, 2010.

SIDDIQUE, R AGGARWAL, Y. AGGARWAL, P. KADRI, E. BENNACER, R. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS). **Construction and Building Materials**. V. 25 (2011) 1916–1925. 16 dez 2010.

SIDDIQUE, R. SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling** 55 (2011) 885– 892. 1 mai 2011.

SIDDIQUE, R. SINGH, G. BELARBI, R. AIT-MOKHTAR, K. KUNAL. Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete. **Construction and Building Materials** 83 (2015) 216–222. 18 mar 2015.

SILVA, I. G. P.; RODRIGUES, D. F.; PINHEIRO, N. V. **Cadeia produtiva da construção civil: uma análise sobre a sustentabilidade**. Centro de Ciências Sociais Aplicadas. Departamento de Administração. UFPB - PRG. 2008. Disponível em:

<http://www.prac.ufpb.br/anais/xenex_xienid/xi_enid/monitoriapet/ANAIS/Area5/5CC_SADAMT01.pdf>. Acesso em: 06/10/2016.

SILVA, C. V. **Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos**. 2011. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SINGH, G. SIDDIQUE, R. Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. **Construction and Building Materials**. 26 (2012) 416–422. 16 jul 2011.

SINGH, G. SIDDIQUE, R. Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS). **Construction and Building Materials**. 28 (2012) 421–426. 4 nov 2011.

SMARZEWSKI, P. BARNAT-HUNEK, D. Mechanical and durability related properties of high performance concrete made with coal cinder and waste foundry sand. **Construction and Building Materials**. V. 121. P. 9–17. June, 2016.

STUMM, W. MORGAN, J.J. **Aquatic Chemistry**, Wiley-Interscience, New York, 1972.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVNER, K. L.. Delayed ettringite formation: Review. **Cement And Concrete Research**, Coniston, v. 1, n. 31, p.683-693, jan. 2001.

TOLEDO, E. B. S. **Método de utilização de areia de fundição e resíduos de poeira de jateamento (micro esferas de vidro) para produzir cerâmica vermelha.** 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

THOMAS, B. S.; KUMAR, S.; MEHRA, P.; GUPTA, R. C. JOSEPH, M.; CSETENYI, L. J. Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles. **Construction And Building Materials**, Bangalore, India, v. 124, p.906-909, 15 out. 2016

VILASBOAS, J. M. L. **Durabilidade das edificações de concreto armado em salvador:** uma contribuição para a implantação da NBR 6118:2003. 2004. 231 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

WATANABE, F. A. **Estudo sobre a utilização de Areia de Fundição Residual como agregado na confecção de pavimentos de concreto.** 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004.

WINKLER, E. S.; BOL'SHAKOV, A. A. **Characterization of foundry sand waste.** Massachusetts: Chelsea Center for Recycling and Economic Development, 82 p., October, 2000. (Technical Report number 8).