

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE MATERIAIS – MESTRADO PROFISSIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**O USO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO
(ADF) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

FERNANDO BATISTA PINTO

ORIENTADORA: Prof.^a. Dr.^a. Regina Mambeli Barros

COORIENTADOR: Prof. Dr. Gilbert Silva

Itajubá, dezembro de 2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE MATERIAIS – MESTRADO PROFISSIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**O USO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO
(ADF) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

FERNANDO BATISTA PINTO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais-Mestrado Profissional da Universidade Federal de Itajubá, sob orientação da Profa. Dr^a. Regina Mambeli Barros e coorientação do Prof. Dr. Gilbert Silva, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais-Mestrado Profissional.

Itajubá, dezembro de 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá
Bibliotecária Jacqueline Rodrigues de Oliveira Balducci- CRB_6/1698

P659u

Pinto, Fernando Batista.

O uso de areia descartada de fundição (ADF) na produção de concreto. / Fernando Batista Pinto. – Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

82 p. : il.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Regina Mambeli Barros.

Coorientador: Prof. Dr. Gilbert Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Areia de Fundição. 2. Recuperação de ADF. 3. Concreto.
I. Barros, Regina Mambeli, orient. II. Silva, Gilbert, coorient.
III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE MATERIAIS – MESTRADO PROFISSIONAL**

FERNANDO BATISTA PINTO

**O USO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF) NA
PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 10 de dezembro de 2013, conferindo o título de MESTRE EM ENGENHARIA DE MATERIAIS – MESTRADO PROFISSIONAL da Universidade Federal de Itajubá MG.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.a. Dr^a. Regina Mambeli Barros – Orientadora - UNIFEI

Prof. Dr. Gilbert Silva – coorientador - UNIFEI

Prof. Dr. Geovani Rodrigues – UNIFEI

Prof. Dr. Valdir Schalch – USP - SC

Itajubá, dezembro de 2013

“Porque Deus não nos deu o espírito de temor, mas de fortaleza, e de amor, e de moderação.”

II Timóteo 1,7

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Prof.^a Regina Mambeli Barros pela valiosa orientação e dedicação e pela paciência com minhas demoras.

Ao meu coorientador Prof. Gilbert Silva, pelo incentivo, apoio e orientação e por acreditar em mim e no nosso trabalho.

Aos caros Prof. Geovani Rodrigues e Prof.^a Valquíria Claret dos Santos por aceitarem participar da banca de qualificação e pela criteriosa leitura e valiosa orientação.

A cada um dos Professores do mestrado pela contribuição na construção deste meu conhecimento e conquista.

À Indústria de fundição Fagor Ederlan® Brasileira de Autopeças Ltda. por disponibilizar o material ADF que viabilizou este estudo.

Aos Caros Reginaldo Afonso Lopes - gerente de Recursos Humanos e Meio Ambiente e a Sidnei Batista Ferreira – coordenador de Meio Ambiente, funcionários da Fagor Ederlan®, pela gentileza em me receber na empresa e ajudar na coleta do material. Agradeço ainda todas as informações dadas sobre o processo de geração da ADF.

À FEPI, Fundação de Ensino e Pesquisa de Itajubá, escola onde me graduei engenheiro civil em 1984, por ter aberto, quase 30 anos depois, as portas de seu Laboratório de Materiais de Construção Civil para que eu pudesse desenvolver a parte prática do meu trabalho.

Aos queridos colegas engenheiros e professores da FEPI – Cidélia, Demarcus e Luciano pelo apoio e informações tão importantes na realização dos ensaios.

Aos queridos alunos da FEPI, Grazielle Gonçalves Inocência pela participação na programação dos ensaios e em especial ao dedicado Lucas Manoel Silva que me acompanhou em todos os momentos que estive no laboratório. Minha gratidão pelas muitas horas de parceria, inclusive no trabalho braçal.

Ao jovem Rômulo Carvalho de Brito graduando em engenharia ambiental da UNIFEI pelo apoio e participação na pesquisa e revisão bibliográfica.

À Escola de Engenharia de Lorena –USP - SP pela realização das análises da ADF por meio da difração de raios x e MEV.

Aos técnicos dos laboratórios de Metalurgia e Materiais da UNIFEI Jonas, Marquinho e Toninho pela realização das análises de difração de raios x, microscopia ótica e MEV.

À minha turma de mestrado, onde pude fazer bons amigos, que Deus ilumine o caminho de cada um de vocês.

A todas as pessoas que de alguma forma tenham acompanhado e contribuído para a realização deste trabalho.

À minha querida amiga Prof.^a Miriam de Lourdes Noronha Motta Melo pelo apoio e incentivo para que eu fizesse este mestrado.

À minha querida Amiga e companheira de trabalho por tantos anos, Helayne Cristina Bustamante Machado, pelo apoio e incentivo de sempre. Sua dedicação é reconhecida por mim e toda minha família. Amamos você.

Ao querido Prof. Fredmarck Gonçalves Leão, colega engenheiro, exemplo de vida íntegra e de dedicação à engenharia. Obrigado pelos seus ensinamentos que vão além da engenharia.

Ao meu querido e saudoso Pai, o Sr. Chico, que se ainda estivesse entre nós diria, como sempre, que o trabalho ficou “joinha”. Agradeço pelo exemplo de persistência, de vida íntegra, de dedicação à família, pelo exemplo de humildade e temor a Deus. Agradeço a Deus a chance de tê-lo acompanhado de perto desde a infância e ter aprendido com ele muitas coisas, entre elas muitas habilidades manuais.

A minha querida Mãe Antônia, mulher forte, corajosa, dedicada a família. Grande Amiga de Deus e Nossa Senhora. Com suas orações sustenta a nossa família. Obrigado pelo seu exemplo de fé. Amo-te!

Aos meus queridos filhos Juliana e Daniel pelo apoio e compreensão nesta fase difícil de nossas vidas. Vocês são o melhor presente que Deus me deu. Amo muito vocês.

À minha querida esposa Robélia, dedico os maiores agradecimentos! Deus abençoou a minha vida com sua presença. Com você construí uma família! Nossos frutos são abençoados! Obrigado pela sua dedicação, parceria, apoio e por ter paciência com meus erros. Amo muito você!

Agradeço principalmente a Deus, pelo dom da vida e por tudo mais que Ele me dá. Que todo conhecimento adquirido possa ser usado para a glória D’Ele.

Resumo

A atividade industrial, geradora de emprego e bens, também tem como resultado a geração de resíduos com o potencial de prejudicar a saúde pública e/ou o meio ambiente. No cenário brasileiro, a areia descartada de fundição (ADF) representa um dos resíduos industriais de maior volume de produção. Conforme a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) são geradas cerca de três milhões de toneladas/ano. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) este resíduo pode ser classificado como Classe I ou Classe II-A, conforme os insumos utilizados na mistura, o que irá ou não conferir periculosidade ao mesmo. A busca por formas adequadas de reaproveitamento das ADF, além de ajudar a reduzir a necessidade de sua disposição em aterros industriais, com isso, diminuindo o risco de acidentes ambientais, também é passível de gerar economia com a substituição parcial deste insumo nos processos que utiliza areia virgem natural. Isto acarretaria a redução da demanda por energia para a extração de areia virgem, além de que originaria uma redução dos custos com o transporte desde sua extração até a indústria. Vários usos são apontados como opções de reaproveitamento das ADF. O presente estudo aponta o uso da ADF como agregado miúdo, substituindo parte da areia natural, na produção de concreto. Portanto, uma solução que pode tanto minimizar o descarte de ADF em aterros industriais, prolongando sua vida útil, como ajudar a poupar recursos naturais que deixariam de ser extraídos para a fabricação de peças de concreto. A ADF utilizada neste estudo foi obtida na indústria de fundição Fagor Ederlan® Brasileira de Autopeças Ltda., da cidade de Extrema- MG, Brasil. As ADF e os demais insumos do concreto foram caracterizados em laboratório, por meio de análises químicas, mineralógicas e granulométricas. Para análise da influência do uso da ADF no concreto, foram moldados corpos de prova com substituição de 0%, 10% e 20% do volume da areia natural, pela areia obtida a partir do resíduo ADF. As propriedades avaliadas foram tanto para o concreto no estado fresco, por meio do *slump* teste, como no concreto endurecido, por intermédio dos ensaios de resistência à compressão axial e absorção por imersão. Os resultados demonstraram que o uso da ADF como agregado miúdo, substituindo parte da areia natural, na produção de concreto é viável tecnicamente, e que tanto a substituição de 10% quanto de 20% apresentam ganhos de resistência no ensaio à compressão. Como um dos objetivos do estudo é apontar caminhos para a diminuição do volume de descarte, o teor que apresenta melhor desempenho é o de 20%.

Palavras-chave: Areia de Fundição, Recuperação de ADF, Concreto.

Abstract

The industrial activity, which generates employment and goods, also results in the generation of wastes which have the potential to adversely affect public health and/or the environment. In the Brazilian context, the foundry sand (*Areia de Fundição*, ADF; in Portuguese) represents one industrial solid waste with largest volume production, according to the Brazilian Foundry Association (*Associação Brasileira de Fundição*, ABIFA; in Portuguese) about three million tons per year have been generated. In accordance with the Brazilian Association of Technical Standards (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*, ABNT, in Portuguese) NBR 10004:2004, this waste can be classified as Class I or Class II-A, according the inputs which has used in the mixture, which will or will not confer the same dangerousness. The research for appropriate ways to reuse the ADF, and to help the reduction in the needed for its disposal in industrial landfills, thereby decreasing the risk of environmental accidents, is also to be expected to generate savings for the partial substitution of this material in the process. This would result in the reduction of energy demand for the extraction of virgin sand, as well as it would lead to a reduction in the transport costs from its extraction to the industry. Several uses have been mentioned as options for reuse of ADF. The present study shows the use of the ADF as fine aggregate, by replacing part of the natural sand in concrete. Therefore, a solution that can both minimize the ADF disposal into industrial landfills, by prolonging its life, as well as to help in saving natural resources that would no longer be mined for the production of concrete parts. The ADF used in the study presented herein was obtained in the foundry industry FagorEderlan® Brazilian AutopartsLtda., in the city of Extrema-MG, Brazil. The ADF and other materials used in concrete were characterized in the laboratory for chemical, mineralogical and textural analyzes. In order to analyze the influence of the use of the ADF in concrete specimens, concretes were molded with replacement of 0%, 10% and 20% of the volume of natural sand, by sand obtained from the ADF waste. The properties were evaluated both in the fresh concrete, by means of slump test, as in hardened concrete, through resistance to axial compression and absorption by immersion essays. The results show that the use of the ADF as fine aggregate by replacing part of the natural sand in concrete production is a viable alternative, and that both the substitution of 10% to 20% present as gains in the resistance to compression essay. As one of the objectives of this study is to point out ways aiming to reduce the discharge volume, the content which performance features improved is 20%.

Key-words: Foundry Sand, ADF Recovery, Concrete.

Lista de Figuras

Figura 2.1 Gráfico da produção global de fundidos entre 1998 e 2009.....	19
Figura 2.2 Gráfico da produção anual de fundidos no Brasil (1970-2009).....	22
Figura 2.3 Gráfico de projeção da produção brasileira de fundidos até 2030.....	23
Figura 2.4 Aterro fundição Tupy®	28
Figura 2.5 ADF como fluído de preenchimento nos espaços entre tubulações.....	30
Figura 2.6 A areia de fundição como base de terceira pista em Ohio	31
Figura 2.7 A areia de fundição enviada para processados terceirizados	31
Figura 2.8 A areia de fundição como agregado em artefatos de cimento	32
Figura 2.9 O efeito dos resíduos de areia de fundição no comportamento do concreto em estado fresco – <i>Slump</i> Teste	35
Figura 2.10 Efeito dos resíduos de areia de fundição na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.....	36
Figura 2.11 Execução de pavimentação com as peças de concreto com ADF.....	39
Figura 2.12 Foto aérea da empresa de fundição Fagor Ederlan®	40
Figura 2.13 Pontos de geração de ADF no processo industrial da Fagor Ederlan®	41
Figura 2.14 Gráfico com volume descartado de ADF no ano de 2011.....	43
Figura 2.15 Gráfico do descarte de ADF em sete pontos distintos.....	43
Figura 2.16 Vista aérea do aterro controlado exclusivo da Fagor Ederlan®	44
Figura 3.1 Curva de Abrams Cimento CPV ARI Plus Holcim®. Fonte: Holcim® Brasil	48
Figura 3.2 Corpos de prova com 1 dia, identificados e prontos para cura	49
Figura 3.3 Equipamento usado para os ensaios à compressão axial.....	51
Figura 4.1 Análise granulométrica dos agregados miúdo e graúdo utilizados para confecção do concreto	55
Figura 4.2 Análise de fases por difratograma (DRX) da areia de fundição	56
Figura 4.3 MEV por elétron secundário: grãos de ADF – Aumento 70x	58
Figura 4.4 MEV por elétron secundário: grãos de ADF – Aumento 150x.....	59
Figura 4.5 Resistência média para os corpos de prova com 7 e 28 dias de cura	63
Figura 4.6 Variação absorção por imersão nos CP	66
Figura 4.7 Variação do teor de vazios nos CP	67
Figura 4.8 Estereoscopia corpo de prova 0% de ADF – Aumento 10x.....	68
Figura 4.9 Estereoscopia corpo de prova 10% de ADF – Aumento 10x	68
Figura 4.10 Estereoscopia corpo de prova 20% de ADF – Aumento 10x	69

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Produção de fundidos no mundo (1998, 2008 e 2009).....	21
Tabela 2.2 Projeção da produção brasileira de fundidos.....	23
Tabela 3.1 Programa experimental dos ensaios com o concreto com ADF.....	50
Tabela 4.1.1 Caracterização da ADF e da areia natural usadas na produção do concreto.....	54
Tabela 4.1.2 Caracterização do agregado graúdo usado na produção de concretos.....	55
Tabela 4.1.3 Parâmetros químicos lixiviado e solubilizado na ADF Fagor Ederlan®.....	57
Tabela 4.2 Relação proporcional (em massa dos concretos executados)	60
Tabela 4.3 Proporção em massa dos componentes do concreto.....	60
Tabela 4.4 Proporção em massa dos componentes do concreto A/C corrigido (0,52)	61
Tabela 4.5 Tabela dos ensaios aleatorizada e identificada.....	61
Tabela 4.6 Abatimentos dos concretos executados	62
Tabela 4.7 Ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova	63
Tabela 4.8 Tabela resultados ensaios absorção por imersão e índice de vazios.....	65
Tabela 4.9 Parâmetros químico no lixiviado e solubilizado da ADF pela NBR 10004	70

Lista de Siglas

A/C - Relação Água Cimento

ABIFA - Associação Brasileira de Fundição

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ADF – Areia Descartada de Fundição

ANOVA – Análise de Variância

AN – Areia Natural

ARI – Alta Resistência Inicial

B1 – Brita Nº 1

CP – Corpo de Prova

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CONOMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

CONSEMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental

DRX – Difração de Raios-X

EDS – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X

FRX – Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

FEPI – Fundação de Ensino e Pesquisa de Itajubá

FUNDEMA – Fundação Municipal de Meio Ambiente

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

VPU – Velocidade de Pulso Ultrassônico

VMP – Valor Máximo Permitido

Lista de Símbolos

Cm – Centímetro

E_{cj} – Módulo de Elasticidade do Concreto

F_{ck} – Resistência Característica à compressão do Concreto

GPa – Giga Pascal

kN – Quilo Newton

Kg – Quilograma

M^3 - Metro Cúbico

MPa – Mega Pascal

m - Massa

mm – Milímetro

Sd – Desvio Padrão

t – Tonelada

v – Volume

ρ – Densidade

ρ_{agua} – Massa Específica da Água

σ_{cj} – Resistência à Compressão Simples

μm – Micrômetro ($1 \times 10^{-6}\text{m}$)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	14
1 JUSTIFICATIVA	14
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 Hipóteses Gerais e Específicas.....	16
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Definição de Resíduos Sólidos.....	17
2.2 Classificação de Resíduos Sólidos	17
2.3 Fundição.....	18
2.3.1 Processos de Fundição	18
2.3.2 A Indústria Global de Fundição.....	18
2.3.3 A Indústria Brasileira de Fundição	21
2.3.4 Perspectiva do Setor de Fundição	22
2.4 Areia de Fundição – AF.....	23
2.4.1 Tipos de Areia de Fundição.....	24
2.4.1.1 Areia Verde	24
2.4.1.2 Areia Ligada Quimicamente.....	25
2.5 Areia Descartada de Fundição – ADF	26
2.5.1 Classificação Quanto à Periculosidade da ADF – Avaliação do Risco Ambiental.....	26
2.5.2 Normas e Regulamentações Brasileiras Sobre ADF	26
2.5.3 Responsabilidade e Riscos na Disposição de Resíduos Industriais.....	27
2.5.4 Volume de Resíduo de ADF Gerado no Brasil	28
2.5.5 Tratamento e Reciclagem de ADF.....	29
2.5.6 A Utilização de ADF na Produção de Concreto Asfáltico e Artefatos de Concreto.....	32
2.5.6.1 Aspectos Regulamentares	32
2.5.6.2 Uso de Areia de Fundição em Concreto	35
2.5.6.3 Pavimentação Intertravada	39
2.6 A Fagor Ederlan® Brasileira de Autopeças Ltda.....	40

2.6.1 Descrição dos Pontos de Uso da ADF no Processo de Fundição da Fagor Ederlan®	41
CAPÍTULO 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
3.1 Características Químicas e Físicas da ADF.....	45
3.1.1 Características Químicas e Difração de Raios X	46
3.1.2 Características Físicas	46
3.2 Concreto com Adição de ADF	46
3.2.1 Materiais Utilizados	46
3.2.1.1 Cimento	46
3.2.1.2 Agregados.....	47
3.2.1.3 Água	47
3.2.1.4 ADF Areia Descartada de Fundição proveniente da Indústria Fagor Ederlan®- Extrema – MG	47
3.3 Dosagem dos Concretos.....	48
3.3.1 O Processo de Cura	48
3.4 Determinação das Propriedades do Concreto	50
3.4.1 Análise das Propriedades do Concreto no Estado Fresco	50
3.4.2 Análise das Propriedades do Concreto no Estado Endurecido	51
3.4.2.1 Resistência à Compressão Axial.....	51
3.4.2.2 Absorção por Imersão	52
3.5 Determinação da periculosidade do concreto com ADF	52
3.6 Análise de Variância – ANOVA	53
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 Caracterização Física dos Componentes do Concreto.....	54
4.1.1 Caracterização Física dos Agregados	54
4.2 Análises de Características da ADF da Fagor Ederlan®.....	56
4.2.1 Análises de difração de Raio X	56
4.2.2 Análises da ADF da Fagor Ederlan® quanto à periculosidade.....	57
4.3 Microscopias com MEV da ADF	58
4.4 Cálculo dos Volumes dos Componentes do Concreto (em massa)	59
4.4.1 Propriedades do Concreto	60
4.5 Análise dos resultados	62
4.5.1 Concreto no Estado Fresco.....	62
4.5.2 Análise dos Resultados de Resistência à Compressão Axial	62

4.5.3 Análise dos Resultados da Absorção por Imersão e Índice de Vazios	65
4.5.4 Análise dos resultados da Microscopia Ótica.....	67
4.5.5 Análise dos Resultados Quanto a Periculosidade	69
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	72
5.1 Conclusões	72
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	73
CAPÍTULO 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	74
CAPÍTULO 7 ANEXOS	79
Anexo 7.1 Cálculo do Traço do Concreto.....	80
Anexo 7.2 Cálculo da Quantidade dos Componentes do Concreto (em massa)	81
Anexo 7.3 Relatório de Ensaios do Cimento CP V Ari Pus Holcim	82

CAPÍTULO 1 - Introdução

1 Justificativa

Entre os resíduos sólidos industriais, as areias de fundição (ADF) representam o de maior volume. No Brasil são geradas cerca de três milhões de toneladas por ano. (ABIFA, 2008).

As empresas que possuem fundição em seus processos produtivos e que, portanto geram o resíduo ADF, têm buscado soluções que minimizem seus custos de matéria prima e da disposição final de seus resíduos, bem como que visem a atender ao crescente rigor das exigências ambientais. Pesquisas têm apontado que o processo de reciclagem pode ser o caminho para o fomento à sustentabilidade do setor de fundição no Brasil. (ABIFA, 2009).

Os processos de reciclagem de ADF ajudam a minimizar os descartes em aterros industriais, diminuindo assim o acúmulo de passivos ambientais, além de poupar a natureza com a redução da extração dos componentes para a produção de areia nova.

As normas, procedimentos e métodos de ensaios de resíduos sólidos são descritos nas seguintes normas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 2004); NBR 10.005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimentos (ABNT, 2004); NBR 10.006 – Solubilização de Resíduos Sólidos – Métodos de Ensaio (ABNT, 2004); NBR – 10.007 – Amostragem de Resíduos – Procedimentos (ABNT, 2004). Dentro dessa classificação, os excedentes de areias de fundição enquadram-se geralmente, nas classes I e II – A, devido à presença de ligantes químicos e metais (COMISSÃO DO MEIO AMBIENTE DA ABIFA, 1999).

Visando à análise da problemática originada pelo manuseio e disposição da ADF e objetivando elaborar uma legislação específica para o setor, em setembro de 2007 foi criado o Comitê Brasileiro de Fundição – ABNT/CB – 59. A atuação do referido comitê consiste na normalização no campo da fundição abarcando a fundição de ferro, de aço e de não ferrosos, insumos, matéria-prima, resíduos no que concerne à terminologia, requisitos, métodos de ensaio e generalidades (ABNT, 2008). Este Comitê instalou a Comissão de Estudos de Areia de Fundição (59:001,01). Dois projetos sobre as Areias Descartadas de Fundição foram iniciados: 59:001.01-001- Áreas de Triagem, disposição e Reciclagem; 59:001.01-002- Aplicações como Agregado em Construção Civil e Coberturas de Aterros Sanitários (ABIFA, 2008).

A reciclagem tem sido apontada em vários estudos como a solução ou ao menos, uma possibilidade de minimização deste grave problema enfrentado pelo setor de fundição. Define-se reciclagem como sendo o conjunto de operações pelo qual o produto final é submetido, a fim de devolver-lhe as características que tornem possível seu uso em um processo produtivo, novamente como matéria-prima. A reciclagem pode ser classificada ainda como interna ou externa, dependendo se sua utilização se dá no processo produtivo original ou fora dele.

A reciclagem interna pode ainda ser dividida em recuperação, que significa trazer de volta as areias já usadas no vazamento das peças, ao processo produtivo; ou ainda, como regeneração, que constitui no processo no qual as areias usadas são submetidas visando proporcionar a limpeza da superfície de seus grãos, removendo os materiais aderidos a fim de devolver-lhes, o máximo possível, as características das areias naturais. Desse modo, esta areia regenerada pode ser introduzida novamente no processo de fundição (ABIFA, 1999).

A reciclagem externa tem sido a forma mais abrangente de reutilização. Seu uso se dá fora do processo que a gerou, na sua forma original, isto é, sem processamento, recebendo apenas limpeza e classificação.

Dentro deste conceito de reutilização externa, podem-se citar alguns usos que já tem sido dado às ADF: pavimentação asfáltica; obras de terraplanagem; material de sub-base em pavimentação; cobertura final de aterros sanitários (ou nas camadas internas) e como material drenante; fluido de preenchimento nos espaços entre tubulações; fabricação de cimento Portland; uso em quadra de tênis ou ciclovias; solos especiais e plantação em vasos; fabricação de tijolos e telhas; e finalmente, fabricação de artefatos de concreto.

Nos EUA as ADF já não são consideradas um passivo e a cadeia produtiva está atuando para torná-las um ativo e estão discutindo a melhor forma de se obter receitas com elas (ABIFA, 2008).

No cenário brasileiro, em Santa Catarina, segundo a Resolução CONSEMA nº 11 (SANTA CATARINA/CONSEMA, 2008), a utilização criteriosa da ADF pode contribuir para o aumento da vida útil dos aterros sanitários e industriais, bem como para a preservação de recursos naturais.

O Estado de São Paulo, por meio da Resolução de Diretoria Nº 152/2007/CE- (CETESB, 2008) definiu as normas legais para o uso da ADF em misturas asfálticas e artefatos de concreto, sem função estrutural. Conforme a Resolução CONSEMA nº. 11 (SANTA CATARINA/CONSEMA, 2008), é considerado como concreto sem função estrutural, o material cujo uso objetiva a confeccionar calçadas, contrapiso, enchimentos e fabricação de artefatos não estruturais, tais como: meio-fio (guias), sarjeta, blocos de vedação, mourões, canaletas

e placas de muro. Entretanto, tais aplicações geralmente, implicam o uso de concretos de resistência C10 e C15 da ABNT 8953.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a problemática das ADF, e avaliar a viabilidade técnica de sua utilização como agregado miúdo, substituindo parcela da areia natural, na produção de concreto.

1.1.2 Objetivos Específicos

Constitui-se em objetivos específicos:

- a) Determinar o teor ótimo de adição da ADF no concreto, por meio da avaliação de suas características mecânicas (resistência à compressão axial) e por intermédio da avaliação da durabilidade do mesmo (ensaio de absorção por imersão);
- b) Analisar a microestrutura dos corpos de prova com substituição de areia natural por ADF e verificar a interface entre a ADF e os demais agregados por meio de microscopia ótica (estereoscopia).
- c) Analisar os resíduos dos corpos de prova, com substituição de areia natural por ADF, quanto à periculosidade através de ensaios de lixiviação e solubilização.

1.2 Hipóteses Gerais e Específicas

A hipótese principal deste estudo é que a substituição de parcela da areia limpa por ADF, na fabricação de concreto é viável tecnicamente.

As hipóteses secundárias são:

- a) Concretos produzidos com adição de ADF não elevam riscos ambientais
- b) Concretos produzidos com ADF possuem desempenho mecânico semelhante aos dos concretos convencionais.
- c) Existe um teor ideal a ser substituído de ADF para um melhor desempenho de suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica

2.1 Definição de Resíduos Sólidos

A norma ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004a), bem como a Resolução CONAMA 313/02 (BRASIL, 2002), consideram resíduos sólidos, aqueles nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades industriais, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São incluídos nesta definição, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cujas particularidades tornem irrealizável o seu lançamento na rede pública de esgotos, ou em corpos de água, ou ainda, que exijam para isso, soluções inviáveis do ponto de vista técnico e econômico, mesmo em face à melhor tecnologia disponível.

De acordo com a Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em seu Art. 3º, Inciso XVI (BRASIL, 2010), os Resíduos Sólidos são considerados qualquer material, substância, objeto ou bem descartado oriundo de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido (BARROS, 2012).

2.2. Classificação de Resíduos Sólidos

Os resíduos, segundo a NBR 10.004, são classificados como perigosos quando suas características proporcionam riscos à saúde dos seres humanos ou acarretam riscos ao meio ambiente quando gerenciado de forma imprópria.

No Brasil, seguem as seguintes normas, segundo a ABNT (2004):

- NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação: Classe I (perigosos), Classe II-A (não perigosos e não inertes) e Classe II-B (inertes);
- NBR 10.005 – Lixiviação de Resíduos;
- NBR 10.006 – Solubilização de Resíduos Sólidos;
- NBR 10.007 – Amostragem de Resíduos.

Dentro dessa classificação, os excedentes de areias de fundição enquadram-se geralmente, nas classes I e II – A, devido à presença de ligantes químicos e metais (COMISSÃO DO MEIO AMBIENTE DA ABIFA, 1999).

2.3 Fundição

2.3.1 Processos de Fundição

Muitos fatores importantes nos materiais fundidos dependem do processo de fundição adotado, tais como o grau de precisão dimensional, o acabamento e as propriedades mecânicas da peça que se pretende fabricar (CASOTTI et al., 2011).

O método que utiliza os moldes confeccionados em areia verde é o processo mais tradicional de fundição de metais ferrosos no Brasil. Ele é o mais utilizado principalmente por sua simplicidade tecnológica, baixo custo e a facilidade de recuperação da areia (CASOTTI et al., 2011).

2.3.2 A Indústria Global de Fundição

A produção global de fundidos alcança hoje 90 milhões de toneladas. A figura 2.1 apresenta um gráfico com o volume da produção de fundidos entre os anos de 1998 a 2009. Durante os anos de 2000 até 2008, a indústria de fundição vinha mostrando crescimento consistente de 4,5% ao ano, até a eclosão da crise financeira internacional, no fim de 2008. (CASOTTI et al., 2011)

Com a crise, a produção de fundidos apresentou decréscimo de 2% frente a 2007 – a primeira queda em oito anos. A partir de 2010, no entanto, a produção de fundidos apresentou recuperação, principalmente em função do desempenho das economias emergentes que hoje é responsável pela maior parte da produção mundial. Nestes locais as pressões ambientais ainda não são tão fortes e a legislação não é tão restritiva (CASOTTI et al., 2011).

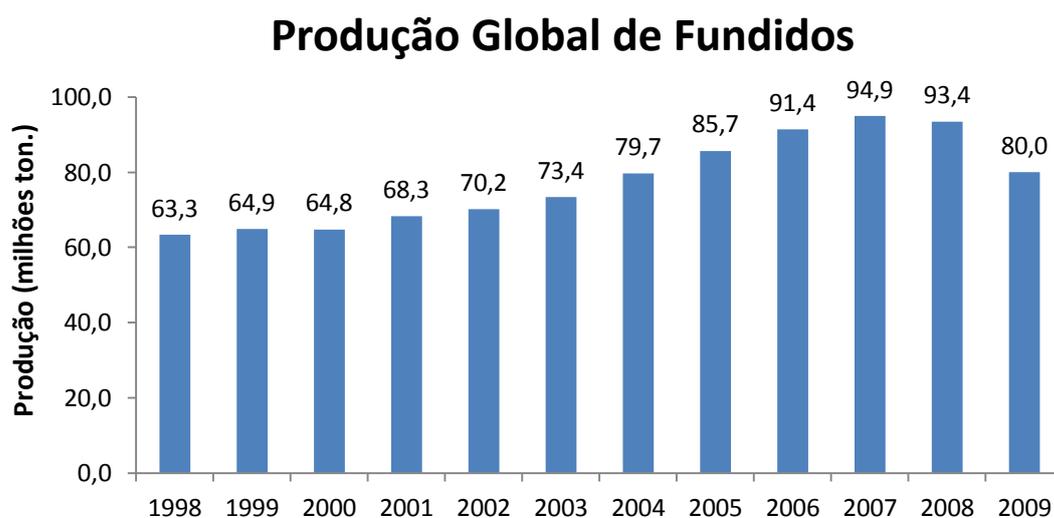


Figura 2.1 – Gráfico da produção global de fundidos entre 1998 e 2009.

Fonte: Modem Casting. Apud Casottiet al. (s.d.)

A China ocupa desde 2007 a posição de maior produtora mundial de fundidos, seguida pelos Estados Unidos e a Rússia. No fim da década de 1990 a liderança cabia aos Estados Unidos, país este seguido pelo Japão. O crescimento acelerado dos setores de infraestrutura, siderurgia e da indústria automotiva na China na última década impulsionou o aumento da produção chinesa de fundidos. A Tabela 2.1 detalha a produção de fundidos dos maiores produtores mundiais nos anos de 1998, 2008 e 2009 (CASOTTI et al, 2011).

Tabela 2.1 - Produção de fundidos no Mundo (1998, 2008 e 2009). Fonte: Elaborado pelo autor com base em Casotti *et al.* (2011)

1998				2008				2009			
Ranking	País	Toneladas	%	Ranking	País	Toneladas	%	Ranking	País	Toneladas	%
1°	Estados Unidos	13.223.700	21	1°	China	33.500.000	36	1°	China	35.300.000	45
2°	China	10.194.006	16	2°	Estados Unidos	10.783.829	12	2°	Índia	7.443.200	9
3°	Japão	6.223.596	10	3°	Rússia	7.800.000	8	3°	Estados Unidos	7.408.071	9
4°	Rússia	4.500.000	7	4°	Índia	6.840.500	7	4°	Japão	4.385.998	6
5°	Alemanha	4.448.692	7	5°	Alemanha	5.783.691	6	5°	Rússia	4.200.000	5
6°	Índia	3.385.900	5	6°	Japão	5.653.798	6	6°	Alemanha	3.901.665	5
7°	França	2.588.953	4	7°	Brasil	3.355.232	4	7°	Brasil	2.296.916	3
8°	Itália	2.330.722	4	8°	Itália	2.638.011	3	8°	Coréia	2.135.000	3
9°	Reino Unido	1.924.300	3	9°	França	2.388.038	3	9°	França	1.736.704	2
10°	Brasil	1.570.000	2	10°	Coréia	2.065.900	2	10°	Itália	1.668.802	2
11°	Coréia	1.522.700	2	11°	México	1.827.665	2	11°	México	1.485.324	2
Total		51.912.569	100	Total		82.636.664	100			71.961.680	Total

2.3.3 A Indústria Brasileira de Fundição

O Brasil ocupa a sétima posição do *ranking* entre os maiores produtores globais de fundidos, com 3 milhões de toneladas anuais. São gerados aproximadamente 60 mil empregos diretos pela indústria brasileira de fundição (CASOTTI et al., 2011)

A produção brasileira de fundidos, conforme ilustrado na figura 2.2, teve um crescimento muito expressivo entre os anos de 1970 a 1980 passando de 700 mil toneladas, em 1970, para cerca de 1,8 milhão de toneladas em 1980. Porém, por duas décadas, entre 1980 e 2000, o volume de fundidos permaneceu em torno de 1,5 milhão de toneladas. No início da década de 1980 houve no Brasil uma grande queda nos investimentos em infraestrutura em função da crise da dívida externa (CASOTTI et al, 2011).

Um crescimento consistente da indústria brasileira de fundição passou a ser sentido apenas a partir de 2001, até que em 2006 foi ultrapassada a barreira de três milhões de toneladas produzidas no ano (CASOTTI et al, 2011).

No período entre 1990 e 2008 houve um crescimento médio anual de 4,2% no consumo de fundidos no Brasil.(BRASIL-MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2009).

Em 2009, novamente atingido pelos efeitos de uma crise financeira mundial o volume de produção sofreu uma queda de 30% em relação à produção de 2008. Foram produzidas 2,3 milhões de toneladas de fundidos chegando aos patamares observados em 2003 (CASOTTI et al, 2011).

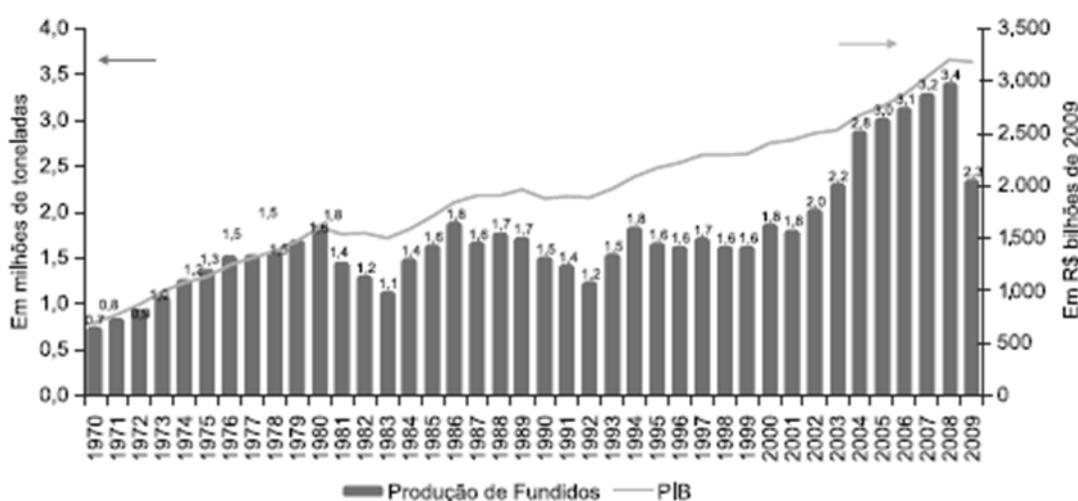


Figura 2.2 – Gráfico da produção anual de fundidos no Brasil (1970-2009).

Fonte: ABIFA, LAFIS e IPEADATA *apud* Casotti *et al.* (2011)

2.3.4 Perspectiva do Setor de Fundição

A ABIFA projeta um crescimento consistente para o setor de fundição nos próximos anos, tanto para o mercado interno quanto para o externo. A indústria de fundição deverá investir no aumento de capacidade de produção, chegando em 2014 a cinco milhões de toneladas (CASOTTI et al., 2011).

De acordo com MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (2009), a análise de três Cenários de Projeção da Economia e do Consumo de Fundidos, explorando coeficientes de elasticidade (1,80) de regressão do PIB e relação com o consumo projetado de laminados de aço levou aos resultados ilustrados na Figura 2.3.

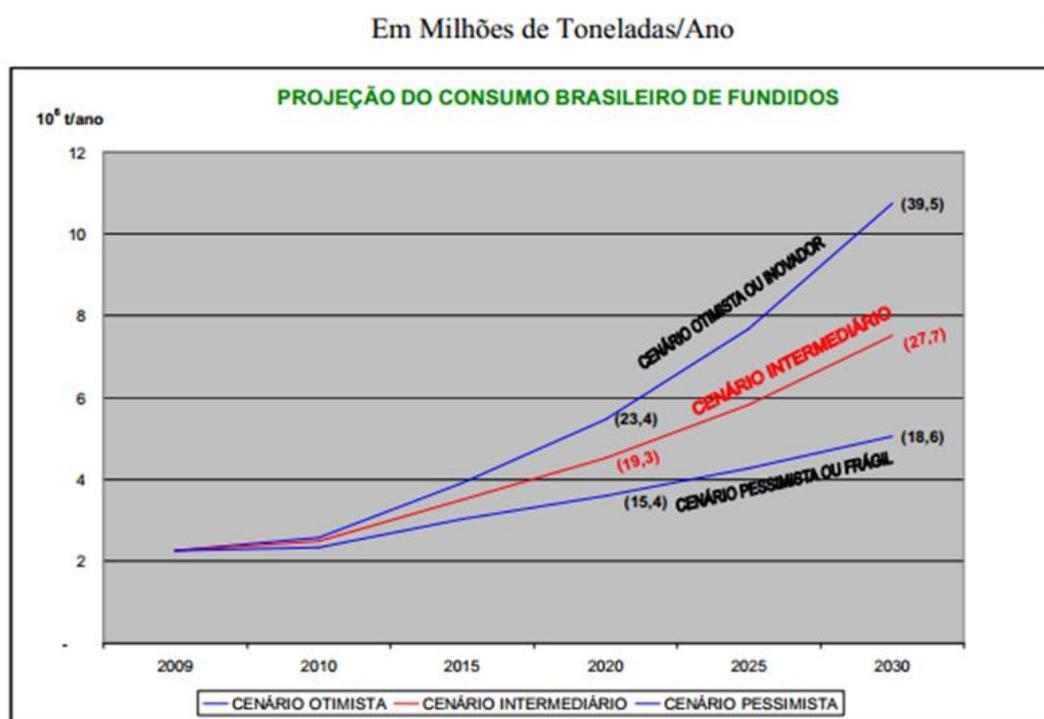


Figura 2.3 - Gráfico de projeção da produção brasileira de fundidos (2009-2030).
Fonte: MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (2009)

Segundo análise do MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (2009), o Cenário Médio de consumo e produção de fundidos no Brasil terá a seguinte projeção:

Tabela 2.2 – Projeção da produção brasileira de fundidos (em mil toneladas).
Fonte Ministério das Minas e Energia (2009)

DISCRIMINAÇÃO	2008	2009	2010	2015	2020	2025	2030
CONSUMO PROJETADO (pelo cenário médio)	2.724	2.261	2.339	3.212	4.580	6.842	10.440
% ao ano		-17,0%	3,4%	6,5%	7,4%	8,4%	8,8%
per capita(kg)		11,4	11,7	15,4	21,2	31,0	46,3
PRODUÇÃO PROJETADA (pelo cenário médio)							
MERCADO INTERNO	2.741	2.261	2.339	3.212	4.580	6.842	10.440
EXPORTAÇÃO	614	443	585	906	1.368	2.281	3.480
TOTAL PRODUÇÃO	3.355	2.704	2.924	4.118	5.948	9.123	13.920
% EXPO/PRODUÇÃO	18,3%	16,4%	20,0%	22,0%	23,0%	25,0%	25,0%
			PREMISSAS OU METAS SETORIAIS DA ABIFA				

2.4 Areia de Fundição – AF

Areia de Fundição, AF, é um produto elaborado pela mistura de alguns elementos. O principal componente da mistura é a “areia base”, que é constituída essencialmente, de sílica (óxido de silício – SiO_2) de formato sub-angular, com tamanhos de grão variando entre 0,15 mm e 0,6 mm. A areia base também pode ser constituída por olivina. Areias revestidas com resina, areias de CO_2 , etc. são alguns tipos comuns de areia ligada quimicamente. (SIDDIQUE e SINGH, 2011; SINGH e SIDDIQUE, 2012). Além da areia base, pó de carvão, bentonita e água são adicionados à mistura. A bentonita é um silicato de alumina hidratado, formado por lamelas e que contém em sua composição silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio. O pó de carvão é formado por material volátil, carbono fixo, cinzas, água e enxofre (PEREIRA et al, 2005).

Existem muitas receitas para a proporção de argila, mas todas são destinadas a atingir diferentes equilíbrios entre moldabilidade, acabamento superficial e capacidade de receber o metal fundido quente para reproduzir o desenho-de-produto (SINGH e SIDDIQUE, 2012), assim como compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos, expansividade volumétrica, permeabilidade e seja de perfeita desmoldagem (BONIN, 1995). Enfim, em razão de suas características plásticas, a bentonita possibilita moldes uniformes, compactos e que reproduzem fielmente as dimensões do modelo. Sua função coesiva confere resistência suficiente à caixa de moldagem, que possibilita que a mesma não se rompa durante o processo de vazamento (CARNIN, 2008). Outros ingredientes de menor incidência são farinha, cereais, casca de arroz e amido.

Cada componente da AF tem sua função: a areia de sílica é a porção maior que resiste a alta temperatura, a argila bentonítica (ou bentonita) liga os grãos de areia entre si, e a água ativa a ação de ligação de argila na areia e adiciona plasticidade. O aditivo carbonáceo evita a fusão de areia sobre a superfície de vazamento. Os ingredientes menores absorvem a umidade e melhoram a fluidez da areia. (SINGH e SIDDIQUE, 2012).

2.4.1 Tipos de Areia de Fundição

São dois os principais tipos de areias de moldagem: “areia verde” e a “areia ligada quimicamente”, que são definidos de acordo com o processo ligante adotado.

Para confeccionar os moldes, que dão forma às superfícies externas da peça a ser fundida, utiliza-se a areia aglomerada com argila e para confeccionar os machos, que conformam as superfícies internas das peças, utilizam-se as areias aglomeradas com resinas sintéticas, que geralmente são de origem fenólica (COUTINHO NETO E FABBRI, 2005).

De qualquer modo, um agente de ligação, de argila ou baseado quimicamente, é adicionado às areias para conservar a forma do molde e o arrefecimento durante o vazamento. As fundições de ferro fundido originam uma grande quantidade de resíduos: um quarto a uma tonelada de resíduos sólidos por fundição, sendo que destes resíduos 30-60% consistem de núcleo e areias de moldagem. (PARK *et al.*, 2012).

2.4.1.1 Areia Verde

Segundo Carnin (2008), toda areia aglomerada com argila e moldada no estado úmido recebe o nome de “areia verde” e nestes casos, os moldes não sofrem secagem previamente ao vazamento. Estes moldes devem adquirir resistência suficiente para atender às solicitações que irão sofrer isto é, boa colapsibilidade, permeabilidade e reusibilidade.

A areia verde é composta de materiais de ocorrência natural, os quais são misturados, areia de sílica de alta qualidade (85-95%), argila de bentonita (4-10%) como um ligante, um aditivo carbonáceo (2-10%), para melhorar o acabamento da superfície de fundição e de água (2-5%), resultando em areia de cor preta, em decorrência do teor de carbono. As areias verdes também podem conter vestígios de produtos químicos, tais como MgO, K₂O e TiO₂ (SIDDIQUE e SINGH, 2011; SINGH e SIDDIQUE, 2012).

Conforme anteriormente mencionado, a argila mais usada como aglomerante da areia verde é a bentonita. As características coesivas e refratárias da bentonita são alteradas quando ocorre o vazamento do metal fundido. A alta temperatura elimina as moléculas de água que estão presentes entre as suas lamelas. A perda de tais características exige que haja constante reposição da bentonita (CARNIN, 2008).

Mais de 70% da produção mundial de fundidos é realizada pelo processo de moldagem por areia verde. Este processo, além de permitir a fabricação de peças de tamanhos bem variados, permite também conformar praticamente todas as ligas metálicas, sendo um dos poucos processos que podem ser usados para metais de alto ponto de fusão, como aços, níquel e titânio (ADEGAS, 2007).

2.4.1.2 Areia Ligada Quimicamente

Quando as peças a serem fundidas apresentarem cavidades ou detalhes, torna-se necessário colocar no interior dos moldes de areia, peças sólidas, denominadas machos, feitas de uma mistura compatível com o metal a ser vazado e com o tamanho da peça fundida. Como as características físicas dos machos e dos moldes são diferentes, exige-se que o seu sistema de fabricação também seja diferente. O sistema mais usado é aquele ligado quimicamente. Os machos devem ser fortes o suficiente para suportar o metal fundido e ter colapsibilidade suficiente para permitir sua remoção da peça fundida após o resfriamento. Geralmente, os machos são extraídos por impacto. (HÖRLLE¹, 2005^{apud} ADEGAS, 2007).

Segundo Siddique e Singh (2011), a areia ligada quimicamente consiste em 93-99% de sílica e 1-3% de ligante químico. Dentre os vários tipos de sistemas de pasta química utilizada na indústria de fundição, os autores (*op. cit.*) ressaltam que os produtos químicos mais comuns entre os sistemas aglutinantes usados são fenólico-uretanos, epóxi-resinas, furfilálcool, e silicatos de sódio. Singh e Siddique (2012) ainda mencionam dentre os vários sistemas de aglutinantes químicos utilizados na indústria de fundição, alguns ligantes como ácidos fenólicos não cozidos, resol-éster fenólicos, silicato de sódio, fosfato, resinas alquídicas (óleo) de uretano, etc.

¹HÖRLLE, Luciana Farias. **Utilização de resíduos de Fundição como matérias-primas para obtenção de produtos com cerâmica vermelha**. 2005, Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, UFRGS. *apud* ADEGAS, Roseane Gonçalves. **Perfil Ambiental dos Processos de Fundição Ferrosa que utilizam Areias no Estado do Rio Grande do Sul**. 108 f., 2007, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Escola de Engenharia, UFRGS, 2007. p.

2.5 Areia Descartada de Fundição – ADF

A ADF é areia proveniente do processo de fabricação de peças fundidas, como areia de macharia, de moldagem, areia verde, preta, de despoeiramento, de varrição, entre outras areias que sejam classificadas conforme ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a) como Classe II – não perigosa livre de mistura com qualquer outro resíduo ou material estranho do processo que altere suas características. No entanto, conforme preconizaram Singh e Siddique (2012), mais de 70% do total de material subproduto do processo de fundição consiste em areia, isto em razão de que os moldes são compostos geralmente de areia de moldagem, que é facilmente disponível, de baixo custo, resistente a danos causados pelo calor e são facilmente coladas com ligante e outro material orgânico. A indústria de fundição utiliza um tamanho específico de areia de sílica de alta qualidade para a seu processo de moldagem e de fundição.

De acordo com a ABNT NBR 15702 (ABNT, 2009), a ADF é um material composto essencialmente por grãos minerais de sílica cujo diâmetro varia entre 4,8 mm e 0,05mm. (BARROS, 2012)

2.5.1 Classificação Quanto à Periculosidade da ADF – Avaliação do Risco Ambiental

Barros (2012) aponta que a ABNT NBR 10004/2004 (ABNT, 2004) define o grau de periculosidade dos resíduos sólidos em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas e ao risco que eles podem apresentar à saúde pública e/ou ao meio ambiente. É de fundamental importância o conhecimento das características químicas da ADF para avaliar o seu desempenho na aplicação que se propõe.

2.5.2 Normas e Regulamentações Brasileiras sobre ADF

Conforme supracitado no presente estudo, em setembro de 2007 foi criado o Comitê Brasileiro De Fundição – ABNT/CB – 59. (ABNT, 2008). Para melhor atingir seus objetivos, o referido Comitê instalou a Comissão de Estudos de Areia de Fundição (59:001,01). Dois projetos sobre as Areias Descartadas de Fundição foram iniciados (ABIFA, 2008):

- 59:001.01-001- Áreas de Triagem, disposição e Reciclagem; e
- 59:001.01-002- Aplicações como Agregado em Construção Civil e Coberturas de Aterros Sanitários.

Após estudos da comissão o primeiro projeto sob o número 59:001.01-001, culminou na norma ABNT NBR 15702:2009, que entrou em vigor em 05 de junho de 2009 tendo como escopo o estabelecimento de “diretrizes para aplicação de areias descartadas de fundição como matéria-prima em concreto asfáltico e cobertura diária em aterro sanitário” (ABNT, 2009).

A norma ABNT NBR 15702:2009 define as condições a serem obedecidas, as documentações a serem geradas e os procedimentos a serem executados por todos os envolvidos: geradores, gestores e usuários das ADF (ABNT, 2009).

O projeto sob o número 59:001.01-002, intitulado “Areia descartada de fundição – Central de processamento, armazenamento e destinação – CPAD” ainda encontra-se em andamento e tem como escopo: Normalização referente aos resíduos de fundição no que concerne a tratamento, utilização, reaproveitamento, armazenamento e transporte (ABIFA, 2013).

2.5.3 Responsabilidade e Riscos na disposição de resíduos industriais

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), em seu art. 27:

As pessoas físicas ou jurídicas referidas no art. 20 são responsáveis pela implementação e operacionalização integral do plano de gerenciamento de resíduos sólidos aprovado pelo órgão competente na forma do art. 24; § 1º A contratação de serviços de coleta, armazenamento, transporte, transbordo, tratamento ou destinação final de resíduos sólidos, ou de disposição final de rejeitos, não isenta as pessoas físicas ou jurídicas referidas no art. 20 da responsabilidade por danos que vierem a ser provocados pelo gerenciamento inadequado dos respectivos resíduos ou rejeitos.

No ano de 2011, um desmoronamento no aterro de areia de fundição da empresa Fundação Tupy®, instalada na zona leste de Joinville, Santa Catarina, fez com que a Fundação Municipal de Meio Ambiente (FUNDEMA) – notificasse a empresa. O aterro localiza-se ao lado da Lagoa da Saguazu (Figura 2.4). A preocupação do órgão ambiental era de que o produto (que deve ser armazenado em aterros específicos conforme a classificação de acordo com a periculosidade, segundo a legislação) causasse danos ambientais (A NOTÍCIA- JOINVILLE, s.d.)

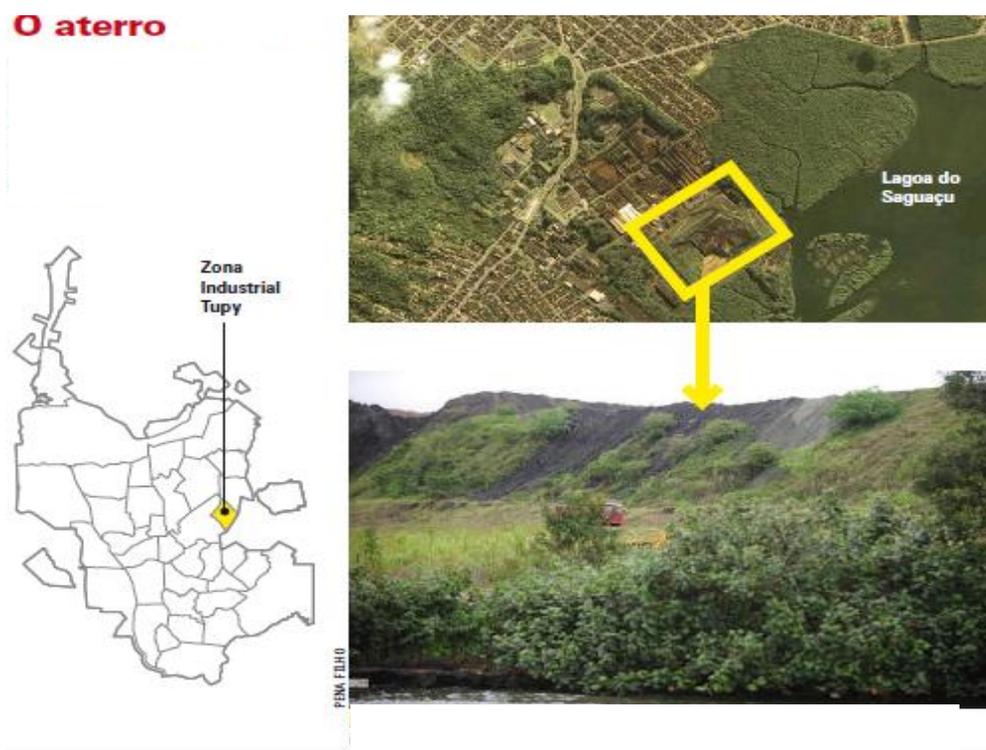


Figura 2.4 – Aterro Fundição Tupy®. Fonte: A NOTÍCIA- JOINVILLE (s.d.)

2.5.4 Volume do Resíduo de ADF gerado no Brasil

Anualmente, são descartadas aproximadamente 2,8 milhões de toneladas destas areias em todo o país. O estado de São Paulo fica com aproximadamente 35% deste montante, seguido de perto pelos estados de Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. (ABIFA, 2009).

O processo de fundição que utiliza a areia verde gera uma polêmica ambiental pelo volume de areia que é descartada. Cerca de 10% do volume total da areia usada, por receber o contato direto do metal fundido e perder as características para uma boa moldagem, fica contaminada e tem de ser descartada (ADF). Os outros 90% podem ser reinseridas no processo de produção. A quantidade consumida de areia depende do tipo da peça produzida e varia entre 0,8 e 1 tonelada para cada tonelada de fundido (CASOTTI et al, 2011).

2.5.5 Tratamento e Reciclagem de ADF

A reciclagem do resíduo ADF tem sido apontada em vários estudos [BONIN, 1995; D'ELBOUX, 2000; COUTINHO NETO, FABRI, 2004; CARNIN, 2008; CARNIN et al, 2010; SIDDIQUE, SINGH, 2011; BARROS, 2012] como a solução ou ao menos a minimização deste grave problema enfrentado pelo setor de fundição.

Define-se reciclagem como sendo o conjunto de operações pelo qual o produto final é submetido a fim de devolver-lhe características que torne possível seu uso num processo produtivo novamente como matéria-prima. A reciclagem pode ser classificada ainda como interna ou externa, dependendo se sua utilização se dá no processo produtivo original ou fora dele.

A ABIFA (1999) ressalta que a reciclagem interna é passível de ser dividida em recuperação (recirculação) ou regeneração. A primeira categoria consiste em reintroduzir no processo produtivo, as areias já usadas no vazamento das peças; e a segunda, consiste no processo no qual as areias são submetidas visando a proporcionar a limpeza da superfície dos grãos da areia-base. Isto é feito por meio da remoção dos materiais aderidos objetivando devolver às areias as características o mais próximo que for possível, das areias novas. Dessa forma, é passível a reintrodução dessas areias regeneradas ao processo produtivo, como matéria prima na fundição.

Diversas frentes de pesquisa estão sendo elaboradas para comprovar a viabilidade do uso da ADF em concreto asfáltico e em artefatos de cimento. Na Índia, onde a produção e fundidos é intensa, pesquisadores como Gurpreet e Siddique, por meios semelhantes a esta pesquisa, buscam novos meios de reutilização da ADF e sua viabilidade em uso estrutural.

Em geral, segundo Park *et al.* (2012), existem três métodos para a recuperação da areia verde de fundição: recuperação térmica, recuperação úmida e recuperação mecânica seca. A recuperação térmica utiliza de calor em um forno rotativo, a exemplo de um forno de leito fluidizado para combustão do ligante e dos contaminantes em temperatura superiores a 700° C, a despeito do risco de emissão de gases originários do forno, que deve ser cuidadosamente controlada. A recuperação úmida, método mais eficaz para a recuperação de areias verdes, utiliza uma fase de atrito mecânico úmido, e é realizada utilizando água e ácido clorídrico ou ácido sulfúrico, e em seguida é seca. No entanto, há uma grande geração de lodo que deve ser necessariamente tratado. A recuperação mecânica seca, método mais econômico e eficiente do que os outros métodos, apesar de produzir grandes quantidades de poeira, usa uma

fase especial de atrito para remover a camada oolítica circundante e os grãos de sílica
separação por ar ou por uma tela de vibração, para separar as partículas finas (PARK *et al.*,
2012).

A reciclagem externa tem sido a forma mais abrangente de reutilização. A reutilização da ADF se dá fora do processo produtivo original. Seu uso se dá na sua forma original, isto é, sem processamento recebendo apenas limpeza e classificação.

Segundo Siddique e Singh (2011), possíveis aplicações de resíduos de areia de fundição poderiam ser: (i) taludes/aterros/barragens, (ii) construção de camadas de barreira; (iii) fluido de preenchimento, (iv) construção de rodovias, (v) agricultura, reforço/emendas do solo, (vi) mistura quente de asfalto, (vii) fabricação de cimento Portland, (viii) Argamassas, (ix) Material de tração sobre neve e gelo; (x) vitrificação de materiais perigosos, (xi) fundição, (xii) fabricação de lã de rocha, e (xiii) fabricação de fibra de vidro (Figuras 2.5 a 2.8).



Figura 2.5-A areia de fundição como fluido de preenchimento dos espaços entre tubulações.
Fonte: ABIFA (1999)



Figura 2.6 – Areia de fundição como base de terceira pista em Ohio, EUA.
Fonte: ABIFA (1999)



Figura 2.7 – A areia de fundição enviada para processadores terceirizados.
Fonte: ABIFA (1999)



Figura 2.8-A areia de fundição como agregado em artefatos de concreto.
Fonte: ABIFA (1999)

2.5.6 A utilização da ADF na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto

2.5.6.1 Aspectos regulamentares

Nos EUA as empresas de fundição têm buscado formas de transformar suas ADF em fontes de receita e estão atuando para torna-las um ativo (ABIFA, 2008). A vida útil dos aterros sanitários e industriais pode ser prolongada, bem como recursos naturais podem ser poupados se houver uma utilização mais criteriosa da ADF. (Resolução CONSEMA Nº 11).

O Estado de Santa Catarina bem como o Estado de São Paulo, dois dos maiores geradores de ADF do Brasil, já editaram normas legais visando definir critérios para a utilização da areia descartada de fundição em misturas asfálticas e artefatos de concreto sem função estrutural (Santa Catarina Resolução CONSEMA 011/2008 e São Paulo Decisão de Diretoria nº 152/2207/C/E.) CETESB.

A Resolução CONSEMA Nº 11 /2008 estabelece critérios para a utilização da Areia Descartada de Fundição de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural.

Art. 1º- Aprovar as definições e os procedimentos para o licenciamento da utilização da areia descartada de fundição de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural. Art. 2º - Esta resolução possui caráter normativo e contém exigências técnicas obrigatórias a serem atendidas pelas empresas geradoras da areia descartada de fundição, assim como, pelas destinatárias deste resíduo. (SANTA CATARINA/CONSEMA, 2008)

Dentre as exigências técnicas a que se refere o Art. 2º desta resolução destacam-se as seguintes ações que deverão ser adotadas pelos geradores de ADF:

- a) Fornecer os dados de caracterização do processo industrial e a quantidade de ADF gerada;
- b) Apresentar os laudos de caracterização e de classificação de ADF, segundo a norma ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004);
- c) Apresentar o resultado da análise química do extrato lixiviado, segundo a norma ABNT NBR 10005.
- d) Apresentar os resultados das análises químicas do extrato aquoso solubilizado;
- e) Realizar de forma adequada a segregação de ADF.
- f) Quando do envio da ADF para a utilização em outra empresa destinatária, deverá solicitar a aprovação de destinação no órgão ambiental.

Já as empresas destinatárias da ADF devem ter seu cadastro de acordo com as normas ABNT e os requisitos da Resolução CONAMA Nº 313/2002 (BRASIL/CONAMA, 2002). Para a utilização da ADF, a empresa destinatária, deverá fornecer:

- a) Carta de aceite formal da empresa destinatária;
- b) Descrição de forma de acondicionamento e transporte da ADF, da origem ao destino;
- c) Cópias autenticadas da sua Licença de Operação;
- d) Informações dos ensaios de caracterização e classificação quanto a periculosidade de ADF.
- e) E ainda, a empresa geradora não poderá misturar ou diluir com outros tipos de resíduos ou outros materiais, para enquadrá-la nas condições descritas neste item;
- f) A empresa destinatária, produtora de concreto asfáltico e de artefatos de concreto sem função estrutural, deverá obter as devidas Licenças Ambientais.

Já no Estado de São Paulo, a norma que dispõe sobre procedimentos para gerenciamento de areia de fundição foi editada através do documento DECISÃO DE DIRETORIA Nº 152 /2007/C/E de 08 de agosto de 2007 - CETESB.

Tal norma foi elaborada considerando-se os princípios e diretrizes da Política Estadual Paulista de Resíduos Sólidos instituídas pela Lei nº 12.300 (São Paulo, 2006). O incentivo às práticas ambientalmente adequadas de reutilização, reciclagem, redução e recuperação e o

reconhecimento do resíduo reutilizável e reciclável como um bem econômico, gerador de trabalho e renda podem auxiliar na minimização de tais resíduos.

No artigo 39 da Lei nº 12.300 (São Paulo, 2006), há a obrigatoriedade de que o transporte dos resíduos perigosos seja executado empregando-se equipamentos apropriados, sendo acondicionados e rotulados devidamente em conformidade com as normas nacionais e internacionais vigentes e pertinentes. Ainda, no parágrafo único desse artigo, há a menção de que em caso que haja a movimentação de resíduos perigosos para fora da unidade geradora, os geradores, transportadores e as unidades receptoras de resíduos perigosos obrigatoriamente devem usar o Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), conforme os critérios estabelecidos pela legislação vigente.

O artigo 40 da lei nº 12.300 (São Paulo, 2006), obriga que o transportador de resíduos perigosos verifique nos órgãos de trânsito do Estado e dos Municípios, as rotas preferenciais por onde a carga irá passar, assim como é obrigatório que o transportador informe ao órgão de controle ambiental estadual o roteiro de transporte dessa carga perigosa.

Em Minas Gerais, também foi instituída a Política Estadual de Resíduos Sólidos por meio da Lei nº. 18.031(MINAS GERAIS, 2009). O artigo 46 desta lei, ressalta a menção ao gerenciamento de cargas perigosas, a saber: o armazenamento, o transporte, o depósito, a guarda e o processamento de resíduos perigosos neste Estado dependem de prévia autorização dos órgãos ambientais competentes, sendo que a importação e a exportação de resíduos perigosos devem obrigatoriamente ser comunicadas ao Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM).

2.5.6.2 Uso de areia de fundição em concreto

No que tange ao uso de areia de fundição em concreto, menciona-se Guney *et al.* (2010) que substituíram 5%, 10% e 15% de massa da areia natural fina por areia de fundição. A quantidade de cimento utilizado foi de 500 kg/m^3 , e proporção das misturas de 0,45 em massa de concreto a ser exposto ao congelamento-descongelamento em condições úmidas. Os resultados do concreto no estado fresco revelaram os efeitos dos resíduos de areia de fundição no ensaio de abatimento consistência (Figura 2.9), em que se observa que os resíduos de areia de fundição diminuiu a fluidez e o abatimento do concreto fresco. Isto foi atribuído pelos autores (*op. cit.*), provavelmente devido à presença de materiais do tipo de argila finas nos resíduos de areia de fundição, que são eficazes na diminuição da fluidez do concreto fresco.

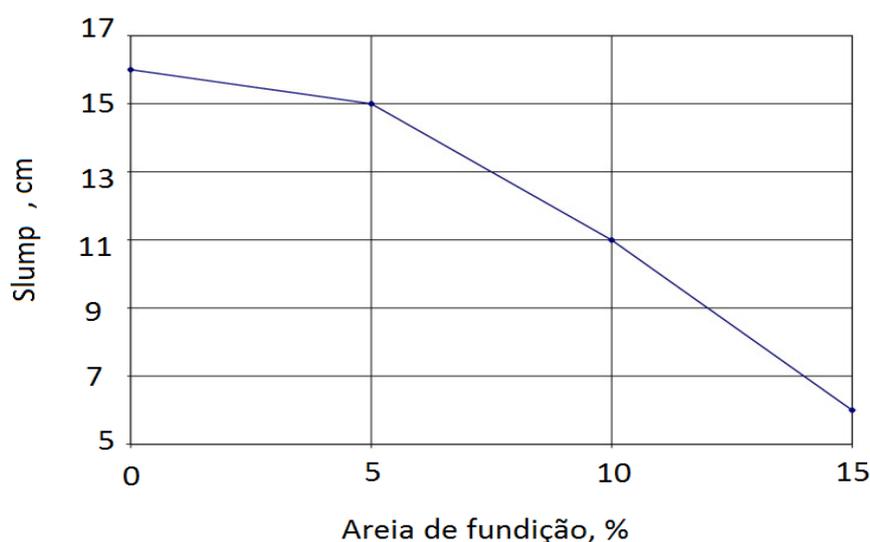


Figura 2.9 - O efeito dos resíduos de areia de fundição no comportamento do concreto em estado fresco – *Slump* Teste.
Fonte: traduzido de Guney *et al.* (2010).

O módulo de elasticidade foi calculado de acordo com a equação 2.1 proposta pela ACI 318 (com a idade de cura de 28 e 56 dias). Basar e Aksoy (2012) apresentam a equação 2.2 (empírica) para cálculo do módulo de elasticidade dos traços de concreto como sugerido pela TS 500:2000, nas idades de cura de 7, 28, 56 e 90 dias.

$$E_{cj} = 0,043xW^3 \quad 2x\sigma_{cj}^1 \quad 2 \quad (2.1)$$

$$E_{cj} = 3250 \frac{\quad}{f_{ckj}} + 14000 \quad (2.2)$$

Onde E_{cj} é o módulo de elasticidade no dia j , em MPa; W é a densidade em kg/m^3 ; σ_{cj} é a resistência à compressão simples, em MPa; f_{ckj} representa a resistência característica à compressão do concreto no dia j , em MPa.

Os módulos de elasticidade calculados por Guney *et al.* (2010) são apresentados na Figura 2.10, na qual observa-se, que a resistência à compressão aumentou com a idade, para todas as misturas testadas. Segundo os autores, foi possível também verificar que a mistura com a dosagem de 10% de resíduos de areia de fundição apresentou maior resistência à compressão com a idade de 56 dias e que a resistência à compressão diminuiu com o aumento da quantidade de areia de fundição. O concreto, com 10% de resíduos de areia de fundição apresentou quase a mesma resistência do que a mistura de concreto controle, enquanto que todas as outras misturas de agregado de resíduos de fundição apresentaram valores mais baixos do que a do controle. Guney *et al.* (2010) atribuíram isso ao fato de que a distribuição de tamanho de partículas da mistura com 10% de resíduos de areia de fundição tem aderência suficiente do que as outras misturas. Em função da Equação (2.1), caso a resistência à compressão de concreto aumente, o módulo de elasticidade estático também irá aumentar, e vice-versa.

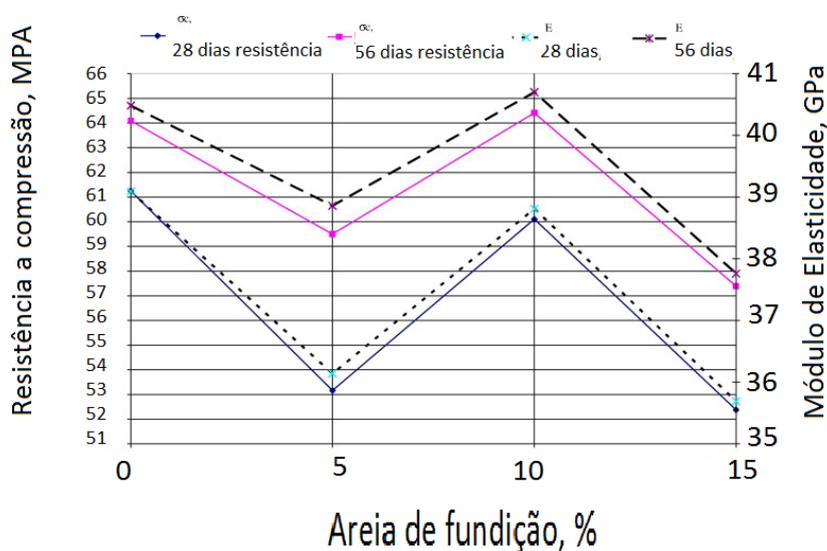


Figura 2.10: Efeito dos resíduos de areia de fundição na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.

Fonte: traduzido de Guney et al. (2010).

Nos estudos de Siddique *et al.* (2009), os valores de resistência a compressão aumentaram com o acréscimo na adição de areia de fundição, no qual o agregado fino foi substituído por três percentagens (10%, 20% e 30% em peso) de areia de fundição. Foram realizados testes para as propriedades do concreto no estado fresco, bem como no estado endurecido (resis-

tência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, etc.) com idade de cura 28, 56, 91 e 365 dias. Segundo os autores, os resultados dos testes apresentaram um aumento na resistência à compressão, com a inclusão de areia de fundição, provavelmente, devido ao fato da areia de fundição ser mais fina do que a areia regular, resultando em uma matriz de concreto mais densa, e também devido ao teor de sílica presente na areia de fundição.

Singh e Siddique (2012) também observaram que as misturas de concreto feitas com areia de fundição apresentaram resistência à compressão maior do que o concreto de controle, sem adição de ADF. A resistência à compressão do concreto controle foi de 40 MPa a 28 dias. Também os autores, avaliaram que com o aumento da idade de cura de 28-91 dias, houve aumento na porcentagem da resistência à compressão das misturas. Estudo comparativo de resistência à compressão aos 28 e 91 dias, indicam que a porcentagem de aumento na resistência à compressão decresce com o aumento do teor em areia de fundição aos 91 dias em comparação a 28 dias, que foi reduzida em 7% a 1,98%.

Basar e Aksoy (2012) desenvolveram pesquisa na qual a areia normal foi substituída por areia de fundição com cinco concentrações (0%, 10%, 20%, 30%, 40%) em peso cuja aplicação de processo fora para todos os traços de concreto. Três aspectos foram investigados: resistência mecânica, a lixiviação e as propriedades microestruturais. Os resultados dos autores (*op. cit.*) indicaram que a adição de areia de fundição como substituição parcial de areia levou à redução no desempenho de resistência e densidade e também aumentou a proporção de absorção de água do concreto. No entanto, o concreto com 20% de adição de areia de fundição apresentou resultados quase semelhantes com o concreto controle. Por sua vez, as características de lixiviabilidade de todas as amostras de concreto em diferentes condições de pH representando casos naturais variantes também foram observados. Além disso, as investigações microestruturais, tanto combinação controle e mistura de concreto com 20% de areia de adição também foram realizadas usando técnicas DRX, FRX, MEV e EDS. Segundo Basar e Aksoy (2012), os resultados desta pesquisa sugeriram que a areia de fundição pode ser efetivamente utilizada na tomada de boa qualidade como um substituto parcial de agregados finos, sem impactos adversos mecânicos, ambientais e microestrutural, no entanto, a substituição parcial não deve exceder 20%.

Segundo estudo de Kathib *et al.* (2013), em que o agregado fino natural foi substituído com 0%, 30%, 60% e 100% de areia de fundição, e a proporção do conteúdo de água, agregado grosso, do cimento e a água para cimentar permaneceu constante. Os concretos foram curados em 1, 7, 28 e 90 dias. As propriedades investigadas nos vários tempos de cura foram: absorção de água por capilaridade, resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassôni-

co (VPU). Os resultados dos autores (*op. cit.*) indicaram que houve um aumento sistemático na absorção de água por capilaridade, uma diminuição na resistência à compressão e VPU, à medida que a quantidade de areia de fundição no concreto aumentou.

Kathib *et al.* (2013) preconizaram que parece haver uma relação linear entre a resistência e a absorção de água por capilaridade, assim como também existe uma relação exponencial entre a resistência e a VPU. Geralmente, segundo os autores (*op. cit.*), existe uma maior quantidade de absorção de água com o aumento do teor de areia de fundição, no final do período de ensaio. Existiu uma pequena diferença na absorção de água, no trabalho de Kathib *et al.* (2013), entre as diferentes misturas após 1 dia de cura e esta diferença tornou-se perceptível após 7 dias de cura e dias seguintes. As misturas contendo 60% e 100% de resíduos de areia de fundição como substituto de areias naturais apresentam uma muito maior absorção de água no final do período de ensaio, em comparação com as misturas que continham 0 e 30% de areia de fundição. Os autores (*op. cit.*) exemplificaram que aos 90 dias de cura, a absorção de água no final do período de ensaio por meio da mistura, contendo 100% de areia de fundição foi cerca de 3 vezes mais do que a mistura de referência (isto é, 0% de areia de fundição). Também, após 1 dia de cura de quase todas as misturas, estas não aparentaram absorver mais água em direção ao fim do período de ensaio, ao passo que em outros tempos de cura das amostras ainda absorveram mais água. A hidratação contínua de concreto além de 1 dia após a cura pode causar o bloqueio dos poros e a água iria demorar mais tempo para ser absorvida.

Guney *et al.* observaram que a absorção de água do concreto com 5% de resíduos de areia de fundição é mais elevado do que o concreto sem resíduos de areia de fundição (controle), com a idade de 56 dias. Entretanto, a proporção de absorção de água diminuiu para as amostras em que continham resíduos de areia de fundição, de 10% e de 15%. Isto pode ser explicado segundo os autores (*op. cit.*), como o consumo de resíduos de areia de fundição diminui os espaços vazios no concreto. Por conseguinte, os valores de absorção de água tem uma tendência para diminuir nas amostras com resíduos de areia de fundição em proporção maiores que 5%. Os autores (*op. cit.*) observaram também que as proporções de absorção de água das amostras com 10% de resíduos de areia de fundição e as amostras sem resíduos de areia de fundição estavam próximas umas das outras. Portanto, as amostras fornecidas com resíduos de areia de fundição possuíam uma capacidade de absorção inferior aos de controle.

2.5.6.3 Pavimentação Intertravada

A norma ABNT NBR 9781(ABNT, 1987) que fixa as condições para a aceitação de peças pré-moldadas de concreto, destinadas à pavimentação de vias urbanas, pátios e estacionamentos ou similares define este material como peça pré-moldada, de formato geométrico regular, com comprimento máximo de 400 mm, largura mínima 100 mm e altura mínima de 60 mm . Sua resistência à compressão axial quando ensaiada conforme norma NBR 9780 deve ser maior ou igual a 35 MPa, para solicitações de veículos comerciais de linha e maior ou igual a 50 MPa, quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão.

A Figura 2.11 apresenta peças de pavimentos intertravados sendo assentados em uma calçada em Joinville – SC em cuja fabricação foi usada a ADF como parte do agregado miúdo na confecção do concreto.



Figura 2.11 – Execução de pavimentação com as peças de concreto com ADF no entorno do 62º Batalhão de Infantaria de Joinville.

Fonte: Carnin, 2010

2.6 A FAGOR EDERLAN® BRASILEIRA AUTOPEÇAS LTDA

A empresa de fundição FAGOR EDERLAN® BRASILEIRA AUTOPEÇAS LTDA., está localizada na cidade de Extrema – MG (Figura 2.12). Para fins de simplificação, doravante, denomina-se apenas a referida indústria por FAGOR EDERLAN®.



Figura 2.12 – Foto aérea empresa de fundição FAGOR EDERLAN BRASILEIRA AUTOPEÇAS LTDA, da cidade de Extrema – MG.
Fonte: Google Earth® (2005)

Apresenta-se na Figura 2.13 um fluxograma simplificado dos pontos de geração de ADF no processo industrial da Fagor Ederlan®

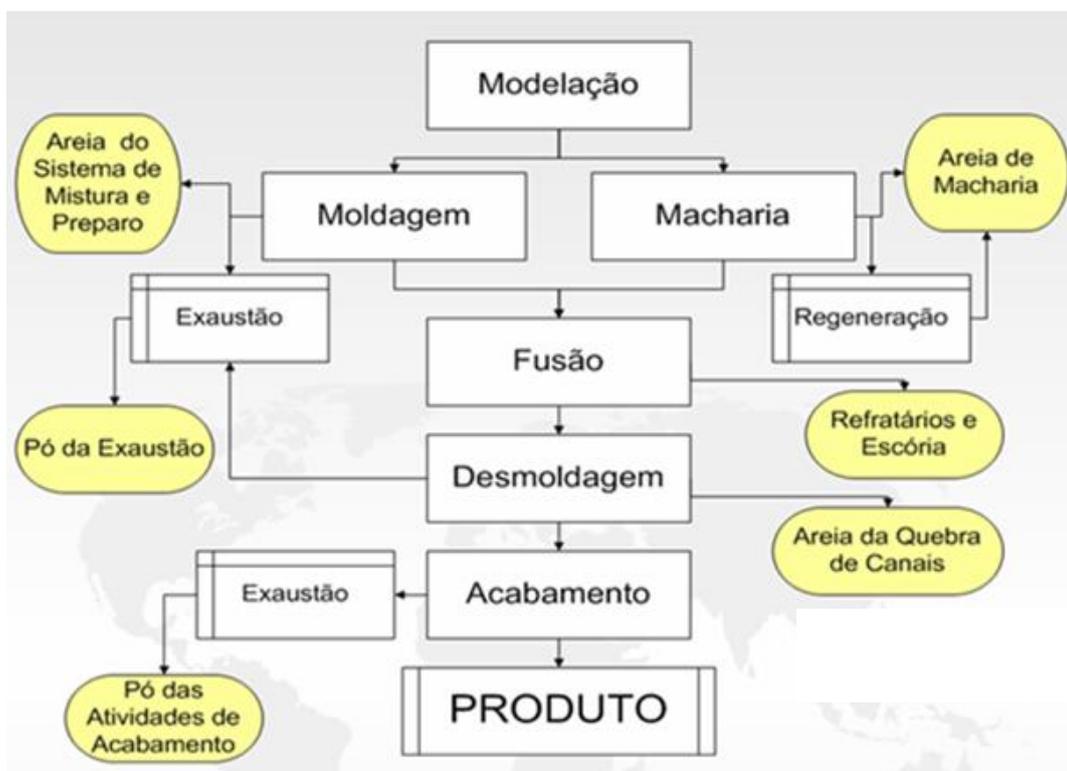


Figura 2.13 – Pontos de geração de ADF no processo industrial da Fagor Ederlan®
 Fonte: Adaptada de Garcia Filho e Carnin (2006)

2.6.1 DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE USO DA ADF NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DA FAGOR EDERLAN®

- a) Recebimento de Matéria Prima para composição dos Moldes e Machos.
 A areia a ser utilizada no processo é recebida via transporte rodoviário e armazenada provisoriamente em dois silos com capacidade total de 27 toneladas.
 A bentonita e o Carvão Cardiff são recebidos em sacos de polietileno (big bags) via transporte rodoviário e armazenados em local coberto e adequado, após são transferidos para um silo de transporte, e deste para o silo de preparação.
- b) Preparação/Recuperação de Areia
 Galpão construído especificamente para estas operações contendo: silo de areia nova, silo de areia usada, silo de carvão, silo bentonita 1 e 2, com equipamentos dosadores para controle da mistura, via balanças. O material dosado segue para o misturador,

sendo misturado com a areia reciclada no processo (usada). Um sistema separador magnético retira da areia usada os elementos residuais de fundidos incorporados durante o processo de vazamento. Adiciona-se água a mistura formada para adequação e correção da umidade, necessária às características do processo de moldagem. Do misturador a “areia” segue para a etapa de moldagem via transporte por esteiras.

c) Preparação de Machos

Do silo de areia nova, parte da areia é encaminhada para o setor de preparação de machos. É empregada areia com granulometria controlada, com teores em menor quantidade de resinas, catalisadores e aglutinantes. A areia do silo é descarregada no misturador que recebe a adição de resina. Do misturador, o material segue para a parte inferior do equipamento, para formatação do molde e adição de amina, na forma gasosa. Para conferir maior resistência a alguns machos produzidos (depende do processo final), utiliza-se um processo de aspersão manual sobre estas peças. Seguido de queima com maçarico de GLP.

d) Moldagem:

Na confecção dos Moldes, são empregados na constituição areia quartzosa de granulometria controlada, argila bentonítica, carvão Cardiff e água, sendo esta mistura previamente preparada no setor denominado Central de Areia Sintética.

e) Vazamento e Desmoldagem

O material fundido é vertido nos moldes através dos canais de vazamento e seguem para solidificação e desmoldagem das peças com reaproveitamento da areia dos moldes, que retorna via esteiras transportadoras para o sistema de preparação e recuperação de areia.

f) Rebarbação e Limpeza

A limpeza das peças produzidas é realizada em máquinas de jateamento automático com material abrasivo (granalhas). Este processo retira as incrustações de areia do molde na peça fundida

De acordo com Fagor Ederlan®, o volume total da ADF descartada no ano de 2011 foi de 23.822 toneladas, conforme Figura 2.14.

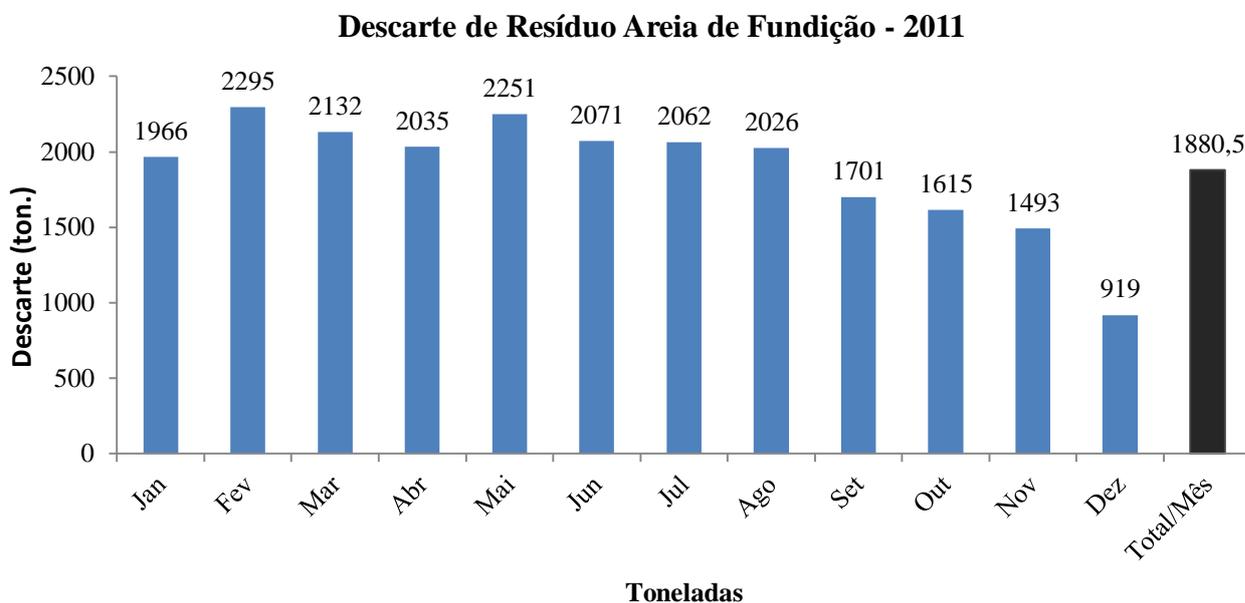


Figura 2.14 – Gráfico com volume de ADF descartado em 2011.

Fonte: Fagor Ederlan® (s.d.)

O descarte da ADF acontece em sete pontos diferentes no processo de produção que são: Bernauer1, Bernauer 2, Macharia, Fusão, Esteira, Acabamento e Silo, representados na Figura 2.15.

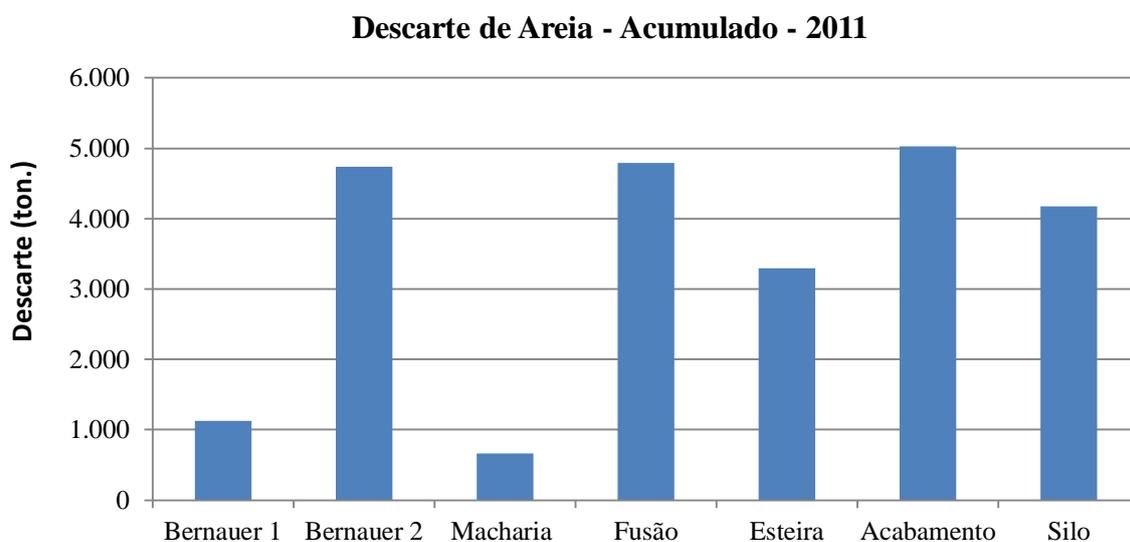


Figura 2.15 – Gráfico do descarte de ADF em sete pontos distintos.

Fonte: Fagor Ederlan® (s.d.)

O material é acumulado e transportado para o aterro controlado exclusivo da Fagor Ederlan®, que fica às margens da Rodovia Fernão Dias, a 10 km da empresa (Figura 2.16)

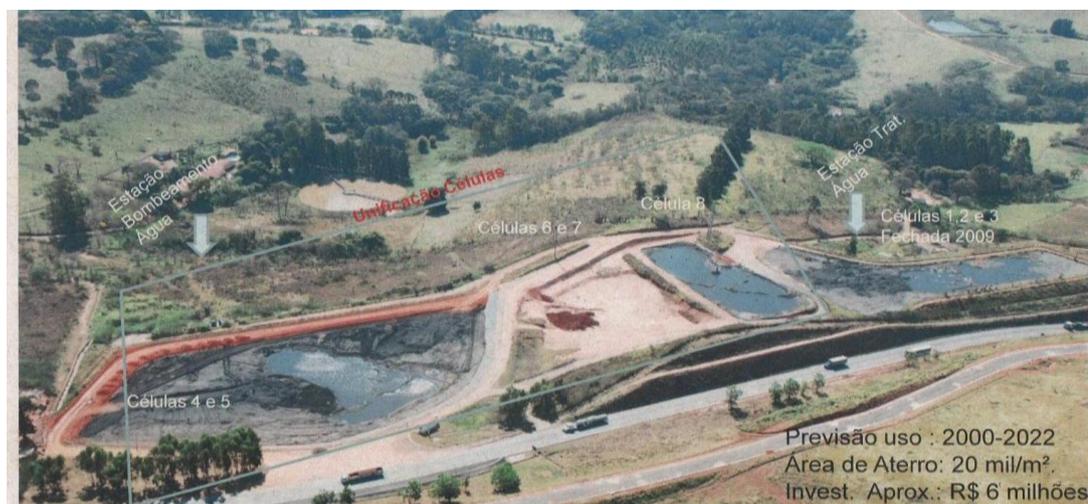


Figura 2.16 – Vista aérea do aterro controlado exclusivo da Fagor Ederlan® (s.d.)
Fonte: Fagor Ederlan® (s.d.)

Em cada fase do processo de fundição, entre 5% e 10% do material são descartados do silo de material usado para ser complementado com material novo. Este material usado e descartado é o objeto do presente estudo.

CAPÍTULO 3 - Procedimento Experimental

3.1 Características Químicas e Físicas da ADF

Neste capítulo apresenta-se a caracterização da ADF (análise química, difração de raios X, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), avaliação do potencial de risco ambiental), quais sejam:

- A viabilidade do uso da ADF nos concretos verificada por meio das propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e parâmetros de durabilidade, como absorção por imersão)

- Verificar a influência da ADF nos concretos e da interação entre as variáveis relacionadas usando o teste estatístico ANOVA- Análise de Variância do software MINITAB.

- O trabalho experimental consta de análise física, granulometria, massa específica, determinação dos traços, ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump* Teste), moldagem dos corpos-de-prova e análise de resistência, com ensaio à compressão axial e ensaio de absorção por imersão. Tais análises foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da FEPI-Itajubá-MG. A difração de raios X e a análise morfológica dos grãos via MEV foram realizadas no Laboratório de análises da Escola de Engenharia de Lorena-USP-Lorena-SP. A análise da microestrutura dos corpos de prova com substituição de areia natural por ADF bem como a caracterização da interface entre a ADF, a areia natural e a brita 1 foi realizada por microscopia ótica(estereoscopia) no LMM- Laboratório de Metalurgia e Materiais da UNIFEI- Itajubá. Para verificar os parâmetros químico no lixiviado e solubilizado, indicados pela ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004) foi realizada análise de fragmentos do concreto com adição de 10% e 20% de ADF nos Laboratórios da TASQA Serviços Analíticos Ltda. – Paulínia – SP.

Visando proporcionar uma maior constância na característica do material a ser usado neste estudo, definiu-se o uso da ADF de um único ponto de descarte. O material escolhido foi a ADF descartada do silo de material usado (figura 2.15), que representa um valor de cerca de 17,5% do total do material descartado.

3.1.1. Características Químicas e difração de raios X

Visando identificar as fases mineralógicas da ADF, foi realizada análise por meio da difração de raios X nos laboratórios da Escola de Engenharia de Lorena-USP (Apresentado na Figura 4.2). Foi usado o difratômetro marca PHILIPS, MODELO EMPYREAN.

3.1.2 Características Físicas

As características físicas estudadas foram: massa específica granulometria e a morfologia dos grãos.

A massa específica foi determinada segundo a norma NBR 6474, código secundário NM52 (ABNT, 2009).

Visando identificar a morfologia e dimensões das partículas da ADF foram realizadas na Escola de Engenharia de Lorena-USP, análises via MEV no modo elétrons secundários.

Visando a analisar a microestrutura dos corpos de prova com substituição 0%, 10% e 20% de areia natural por ADF e estudar a caracterização da interface entre a ADF, a areia natural e a brita 1 foi realizada a microscopia ótica - estereoscopia no LMM- Laboratório de Metalurgia e Materiais da UNIFEI- Itajubá, no Estereoscópio marca Olympus, modelo SZ61 e usado o Software – Analysis DOCU. Apresentados nas Figuras 4.10 a 4.12

3.2 Concreto com adição de ADF

3.2.1 Materiais utilizados

3.2.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CPV ARI Plus Holcim®, sem nenhum tipo de adição, para melhor avaliação da influência da ADF.

As análises do cimento foram realizadas pelo fabricante HOLCIM®, conforme consta no anexo 7.1 As análises químicas, físicas e propriedades mecânicas do cimento CPV estão em conformidade com o padrão da NBR 5733 (ABNT, 1991).

3.2.1.2 Agregados

Os agregados utilizados para confecção do concreto ora em estudo foram:

a) Agregado Miúdo – Areia média de rio

O agregado miúdo utilizado foi a areia média do rio Sapucaí, pouco angulosa e comercialmente disponível. As características físicas e a distribuição granulométrica são apresentadas na Tabela 4.1.1

b) Agregado Graúdo – Brita 1 – origem granítica

O agregado graúdo utilizado para a confecção do concreto foi de origem granítica, com as características físicas e distribuição granulométrica apresentadas na Tabela 4.1.2.

3.2.1.3 Água

A água utilizada para a produção dos concretos foi proveniente do sistema de abastecimento público da COPASA Minas Gerais, cujas características atendem a NBR 6118 (ABNT, 1980).

3.2.1.4 Adição – ADF – Areia Descartada de Fundição proveniente da Indústria Fagor Ederlan® - Extrema - MG

Foi utilizada como adição, a ADF proveniente da Indústria Fagor Ederlan®, com as características quanto a periculosidade apresentadas na Tabela 4.1.3 e as características físicas e a distribuição granulométrica apresentadas na Tabela 4.1.1. O presente estudo baseou-se em Guney *et al.* (2012), no qual parte da areia natural fina foi substituída pelo resíduo areia de fundição nos percentuais de 5%, 10% e 15% em massa. O volume de adição não ultrapassou a substituição de 20% em massa em função do pressuposto por Bassar e Aksoy (2012), segundo os quais acima desse valor existem os riscos prementes de impactos adversos mecânicos. Também, a escolha pelo limitante preconizado por Kathib *et al.* (2013), acerca da absorção de água por capilaridade, como indicado pela taxa de absorção de água por unidade de área, aumenta quando a areia normal é substituída por uma quantidade crescente de resíduos de areia de fundição. Isto é acompanhado por uma diminuição da resistência e da velocidade de impulso de ultrassons. Como no estudo de Kathib *et al.* (2013), as misturas com 60% e 100% de resíduos de areia de fundição apresentaram uma muito maior absorção de água no final do

período de ensaio, em comparação com as misturas que continham 0 e 30% de areia de fundição, o estudo ora apresentado limitou-se a 20%, em razão do aumento da absorção de água e limitações ambientais.

3.3 Dosagem dos Concretos

A determinação dos traços do concreto, em função da relação água/cimento e faixa de abatimento de 0 a 50 mm foram realizados conforme descrito a seguir.

Os traços foram determinados segundo o método ACI (American Concrete Institute *apud* BAUER, 2000) em consideração a relação água/cimento (fator A/C) e o teor de ADF. Para obtenção do fator A/C, fora utilizado a curva de Abrams para o cimento Holcim CPV ARI Plus na figura 3.1, encontra-se para F_{cj} (MPa) a ser calculado por meio da equação 3.1.

$$F_{cj} = F_{ck} + 0,84.S_d \tag{3.1}$$

Onde:

F_{cj} : é a resistência média a compressão do concreto aos j dias (MPa);

F_{ck} : é a resistência característica do concreto à compressão (MPa); e

S_d : desvio-padrão (MPa)

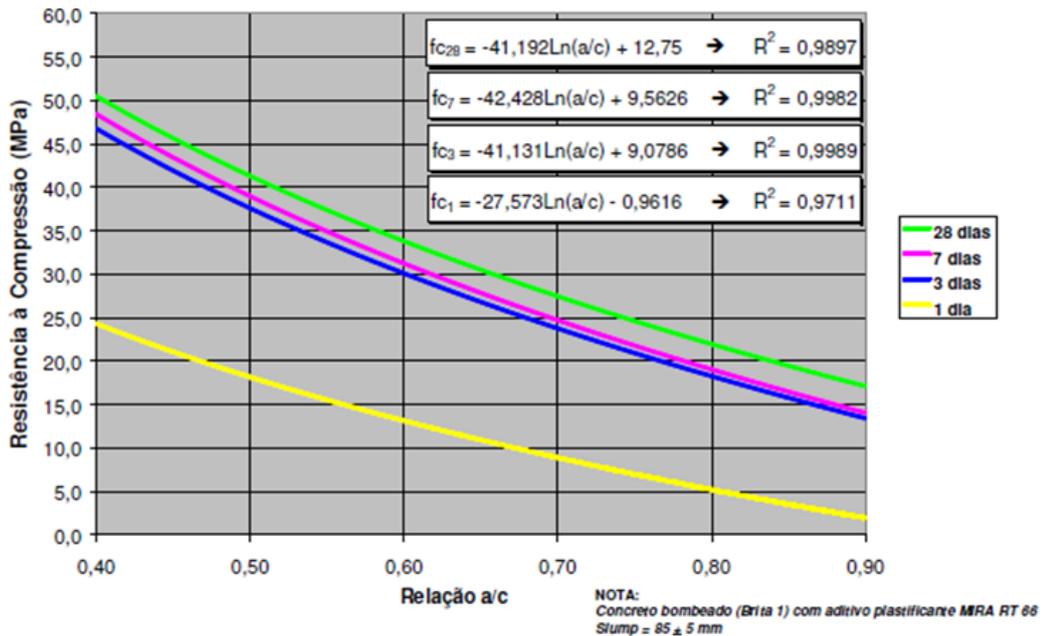


Figura 3.1 – Curva de Abrams Cimento CPV ARI Plus Holcim®. Fonte: Holcim® Brasil

Os corpos de prova de concreto cilíndricos foram moldados de acordo com as recomendações da ABNT NBR 5738 (ABNT, 2003).

A confecção dos concretos seguiu a seguinte ordem de colocação dos materiais na mistura:

- a) 100% do agregado graúdo
- b) 50% da água
- c) 100% do cimento
- d) 100% da adição (quando havia)
- e) 50% da água restante
- f) 100% do agregado fino

O tempo de duração de cada mistura se estendeu entre 5 e 6 minutos em função da coesão e consistência da mistura e dificuldade de sua homogeneização.

3.3.1 O Processo de Cura

Após a moldagem os moldes com os corpos de prova foram colocados sobre uma bancada rígida e nivelada dentro do laboratório e durante as primeiras 24 h foram mantidos devidamente cobertos com a finalidade de evitar perda de água. Após as 24 h os corpos de prova foram devidamente desmoldados e devidamente identificados, conforme Figura 3.2. Imediatamente após sua identificação, os corpos-de-prova foram armazenados em solução saturada de hidróxido de cálcio a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ onde ficaram até o momento dos ensaios.



Figura 3.2-Corpos de prova com 1 dia, identificados e prontos para cura de 7, 28 e 35 dias

3.4 Determinação das propriedades do concreto

A avaliação do comportamento mecânico e de durabilidade dos concretos referência e com adição de ADF foi realizada de acordo com o programa experimental exposto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Programa Experimental dos ensaios com o Concreto com ADF

	ENSAIOS	IDADE (dias)	Corpo de Prova cilíndrico	Nº Corpos de Prova
Referência	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	7	10 x 20 cm	3
		28		3
	Absorção por Imersão (NBR 9778)	35	10 x 20 cm	2
10% ADF	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	7	10 x 20 cm	3
		28		3
	Absorção por Imersão (NBR 9778)	35	10 x 20 cm	2
20% ADF	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	7	10 x 20 cm	3
		28		3
	Absorção por Imersão (NBR 9778)	35	10 x 20 cm	2

3.4.1 Análise das Propriedades do Concreto no Estado Fresco

A trabalhabilidade do concreto foi avaliada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump Teste*), conforme ABNT NBR NM 67 (ABNT, 1998). O abatimento foi estabelecido como uma variável controlada, fixado na faixa de 0 – 50 mm.

3.4.2 Análise das Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

Por intermédio dos ensaios de Resistência à Compressão Axial –(ABNT NBR 5739, 2007) realizados em equipamento da marca KRATOS, modelo PCK 120, Figura 3.3, foram avaliados os corpos de prova com idades de 7 e 28 dias para cada tipo de concreto, de referência e com adição de 10% e 20% de ADF e com o Ensaio de Absorção por Imersão (ABNT NBR 9778; ABNT,2005) foram avaliados os corpos de prova com idade de 35 dias.



Figura 3.3 - Equipamento usado para os ensaios à compressão axial

3.4.2.1. Resistência à Compressão Axial

Para a verificação do efeito da incorporação da ADF na resistência à compressão axial foram moldados três corpos de prova cilíndricos por idade para cada tipo de concreto, de referência e com adição de 10% e 20% de ADF. Adotou-se a realização do ensaio em réplica para dar maior confiabilidade aos resultados. A resistência a compressão foi avaliada nas idades de 7 e 28 dias, de acordo com a ABNT NBR 5739 (ABNT, 2007).

O módulo de elasticidade foi calculado conforme equação 2.2 (BASAR e AKSOY, 2012), aqui reescrita para fins de facilidade de leitura.

$$E_{cj} = 3250 \sqrt{f_{ckj}} + 14000 \quad (2.2)$$

Onde E_{cj} é o módulo de elasticidade no dia j, em MPa; e f_{ckj} representa a resistência característica à compressão do concreto no dia j, em MPa.

3.4.2.2 Absorção por Imersão

Este ensaio foi realizado a frio, nos corpos de prova com idade de 35 dias, conforme determina a ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005) e mostrou a absorção do concreto num tempo e seu índice de vazios, por meio da relação entre a massa seca e saturada da amostra, sem levar em consideração a velocidade da absorção.

Para estes ensaios foram moldados dois corpos de prova para cada tipo de concreto, de referência e com adição de 10% e 20% de ADF. Adotou-se a realização do ensaio em réplica para dar maior confiabilidade aos resultados.

3.5 Determinação da periculosidade do concreto com ADF

Os ensaios quanto à periculosidade foram efetuados nos Laboratórios da TASQA Serviços Analíticos Ltda. – Paulínia – SP, em conformidade com a ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a), a saber:

- Ensaio de lixiviação da ADF- ABNT NBR 10005 (ABNT 2004);
- Ensaio de solubilização da ADF – ABNT NBR 10006 (ABNT 2004);
- Massa Bruta: Os parâmetros analisados apresentaram valores adequados às indicadas na Norma ABNT/NBR 10004:2004 para as concentrações de 10% e 20% de ADF.
- Lixiviado: Os parâmetros analisados apresentaram concentrações adequadas as indicadas no Anexo F da norma ABNT NBR 10004:2004 para as concentrações de 10% e 20% de ADF.
- Solubilizado: Os parâmetros analisados Fenóis Totais apresentaram concentrações superiores tanto na mistura com 10% quanto na com 20% e o Alumínio apresentou concentração superior na mistura de 10%, com referência aos valores indicados no Anexo G da norma ABNT/NBR 10004:2004.

A pedido da empresa, o corpo-de-prova foi triturado previamente à análise.

3.6 Análise de Variância – ANOVA

A análise de variância é a técnica estatística que permite avaliar afirmações sobre médias populacionais. A análise visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. A ANOVA é um teste estatístico que está implementado em vários softwares como o MINITAB® e o MS EXCEL®. A ANOVA é um procedimento para testar a hipótese de que três ou mais médias populacionais são iguais de modo que

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

H₁: pelo menos uma das médias é diferente das outras.

Em que: H₀ : Hipótese Nula , H₁ : Hipótese alternativa , μ : Média das Variáveis estudada.

Em um experimento, podem ser medidas muitas variáveis, mas devem-se considerar somente aquelas que possam contribuir para a explicação da hipótese formulada. Uma das maneiras do teste ANOVA avaliar a significância da estatística F é utilizando o p-valor. Inicialmente adota-se um valor α = nível de significância, usualmente de 5%, abaixo do qual se pode descartar a hipótese H₀. Compara-se o p-valor (Pvalue) com α e se p-valor > α não é rejeitada a hipótese de nulidade de H₀, ou seja, não há evidências de diferenças significativas entre os resultados, ao nível α de significância escolhido. Neste estudo, foi utilizada a ANOVA do software MINITAB® (MINITAB, 2003) e a hipótese formulada, tido como H₀ foi “o uso de ADF como substituição de parte da areia natural no concreto não provoca alterações significativas no mesmo.” As variáveis medidas foram – a resistência do concreto, a absorção por imersão e o índice de vazios.

CAPÍTULO 4 Resultados e Discussão

4.1 Caracterização física dos componentes do concreto

A caracterização física dos materiais componentes do concreto é composta pelos resultados dos agregados miúdos (ADF-areia de fundição e AN-areia natural), agregado graúdo (brita granítica n°1), conforme se segue.

4.1.1 Caracterização Física dos Agregados

O agregado miúdo utilizado foi a areia média de rio(AN), quartzosa, pouco angulosa, disponível comercialmente. As características físicas e a distribuição granulométrica da areia de fundição ADF e dos agregados miúdos areia natural, estão relacionadas na tabela 4.1.1.

Tabela 4.1.1 - Caracterização da ADF e da areia natural usadas na produção do concreto.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA		
PENEIRA (ABNT)	% Média Acumulada	
Abertura (mm)	ADF	AN -Areia natural
6,3	0	0
4,75	0	0
2,36	0,01	2,83
1,18	0,43	12,54
0,6	1,21	38,17
0,3	43,71	73
0,15	96,79	94,75
<0,15	100	100
Dimensão Máxima Característica	0,6	2,36 mm
Módulo de Finura (NM 248) 2003	1,42	2,21
Gradação (NM 248) 2003	Média	Média
Massa Específica (NM52) 2009	2,40g/cm ³	2,630 g/cm ³

A areia natural e a areia de fundição, apresentaram-se com gradação média conforme NM 248, e dimensão máxima característica, 2,36 e 0,6 mm respectivamente. Os módulos de finura da areia natural e da areia de fundição foram de 2,21 e 1,42 respectivamente. As massas específicas de areia natural e a areia de fundição foram de 2,63g/cm³ e 2,40g/cm³, respectivamente.

A Tabela 4.1.2 apresenta a caracterização do agregado graúdo para a produção do concreto em estudo e a Figura 4.1 mostra as granulometrias dos materiais agregados (miúdo e graúdo) empregados.

Tabela 4.1.2 - Caracterização do Agregado graúdo usado na produção de concretos.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
PENEIRA (ABNT)	% Média Acumulada
Abertura (mm)	
37,5	0
19	1,9
9,5	89,85
4,75	98,4
2,36	100
< 2,36	100
Dimensão Máxima Característica	19 mm
Módulo de Finura (NM 248) 2003	6,9
Massa Específica (NM53) 2009	2,730 g/cm ³
Absorção (NM53) 2009	0,50%
Torrões de Argila (NBR 7218)	s/ Presença
Massa Unitária (NM45) 2006	1,6 g/cm ³

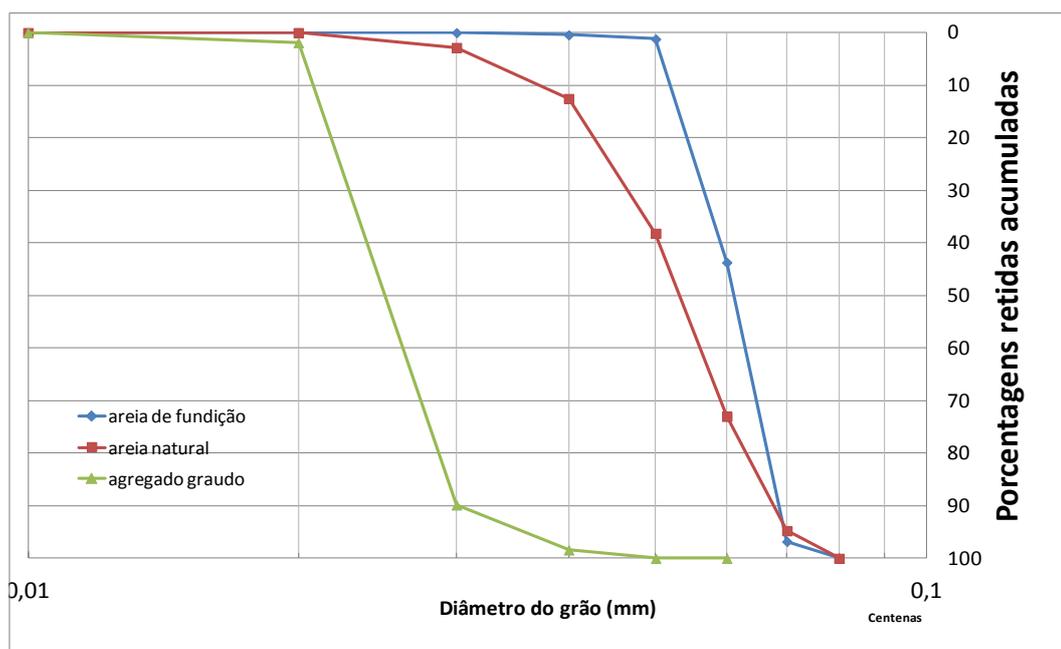


Figura 4.1 – Análise granulométrica dos agregados miúdo e graúdo utilizados para confecção do concreto

4.2. Análises de características da ADF da FAGOR EDERLAN®

4.2.1 Análises de difração de Raios X

Os resultados encontrados quanto à difração de raios X estão apresentados no difratograma da figura 4.2.

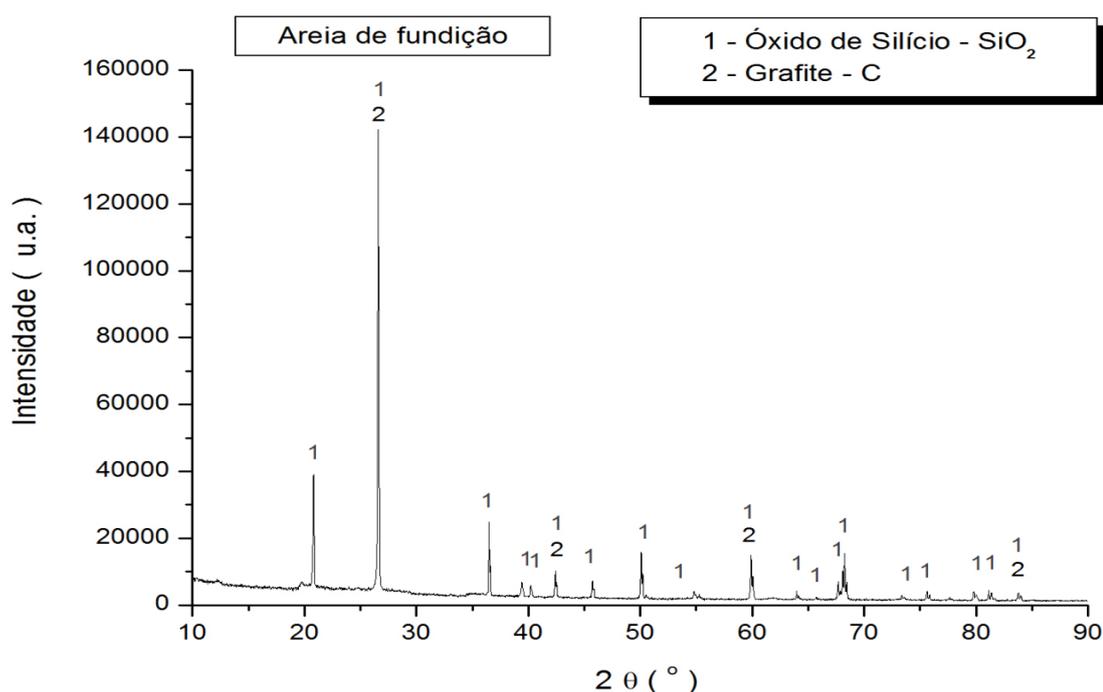


Figura 4.2 – Difratograma da areia de fundição.

Este resultado corrobora o que fora preconizado por autores como Siddique e Singh, (2011) e Singh e Siddique (2012) segundo os quais a areia verde é composta por areia de sílica de alta qualidade (85-95%), argila de bentonite (4-10%), um aditivo carbonáceo (2-10%), e água (2-5%), resultando em areia de cor preta, em decorrência do teor de carbono. As areias verdes também podem conter vestígios de produtos químicos, tais como MgO, K₂O e TiO₂. A areia ora em estudo revelou o alto teor de carbono (grafite) e Óxido de Silício (SiO₂), uma vez que a areia é de sílica e em grande quantidade (89-95%).

4.2.2 Análise da ADF quanto a periculosidade

A indústria Fagor Ederlan® forneceu os resultados dos laudos dos ensaios quanto à periculosidade (Tabela 4.1.3) efetuados nos Laboratórios da Montanari & Camargo S/C LTDA – Atibaia – SP, em conformidade com a ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004), a saber:

Ensaio de lixiviação da ADF- ABNT NBR 10005 (ABNT 2004);

Ensaio de solubilização da ADF – ABNT NBR 10006 (ABNT 2004); e

Amostragem da ADF realizada conforme a ABNT NBR 10007 (ABNT, 2004)

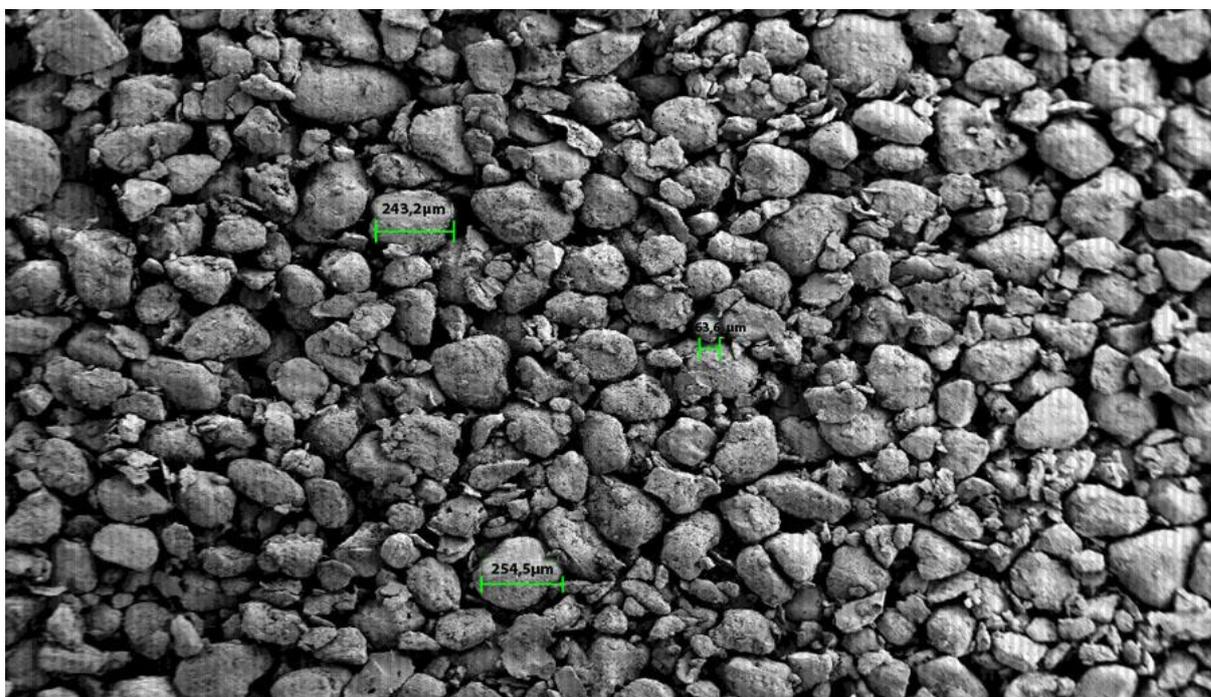
Tabela 4.1.3 - Parâmetros químicos no lixiviado e solubilizado da ADF pela NBR10004.
Fonte: Fagor Ederlan® (s.d.)¹⁾

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)		Solubilizado (mg/L)	
	NBR 10005		NBR 10006	
	Resultados	VMP ¹	Resultados	VMP ¹
Alumínio			0,45	0,2
Arsênio	< 0,01	1	< 0,01	0,01
Bário	4,8	70	0,4	0,7
Cádmio	0,01	0,5	< 0,001	0,005
Chumbo	0,01	1	< 0,001	0,01
Cianetos			< 0,01	0,07
Cloretos			83	250
Cobre			0,31	2,0
Cromo Total	0,04	5	0,05	0,05
Fenóis Totais			< 0,01	0,01
Ferro			15,45	0,3
Fluoretos	< 0,20	150	< 0,20	1,5
Manganês			1,08	0,1
Mercúrio	< 0,01	0,1	< 0,001	0,001
Nitrato(expresso em N)			1,3	10,0
Prata	< 0,01	5,0	< 0,01	0,05
Selênio	< 0,01	1,0	< 0,01	0,01
Sódio			92	200
Sulfato (expresso em SO ₄)			104	250
Zinco			1,02	5,0

Nota: 1) ENSAIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS
NORMA: ABNT/NBR 10004:2004 - RESÍDUOS SÓLIDOS (CLASSIFICAÇÃO)
foram realizados nos Laboratórios da Montanari& Camargo S/C LTDA – Atibaia – SP.

4.3 Análises da ADF via Microscopia Eletrônica de Varredura

Nas fotomicrografias das figuras 4.3 e 4.4, pode-se observar uma distribuição heterogênea do tamanho das partículas, com dimensões que variam de 55 a 250 μm . Possui uma morfologia de partícula angular tendendo a esférica. Tais resultados corroboram o que fora mencionado por Pereira *et al.* (2005), que caracterizaram a areia de fundição como sendo de formato sub-angular, e distribuição heterogênea do tamanho das partículas com grão variando entre 150 μm a 600 μm .



200 μm
|—|

Resíduo de areia
de fundicao

Mag = 70 X

Signal A = SE1 WD = 12 mm

EHT = 5.00 kV LME-DEMAR-EEL-USP

Figura 4.3 – MEV por elétron secundário: grãos de ADF – Aumento 70x

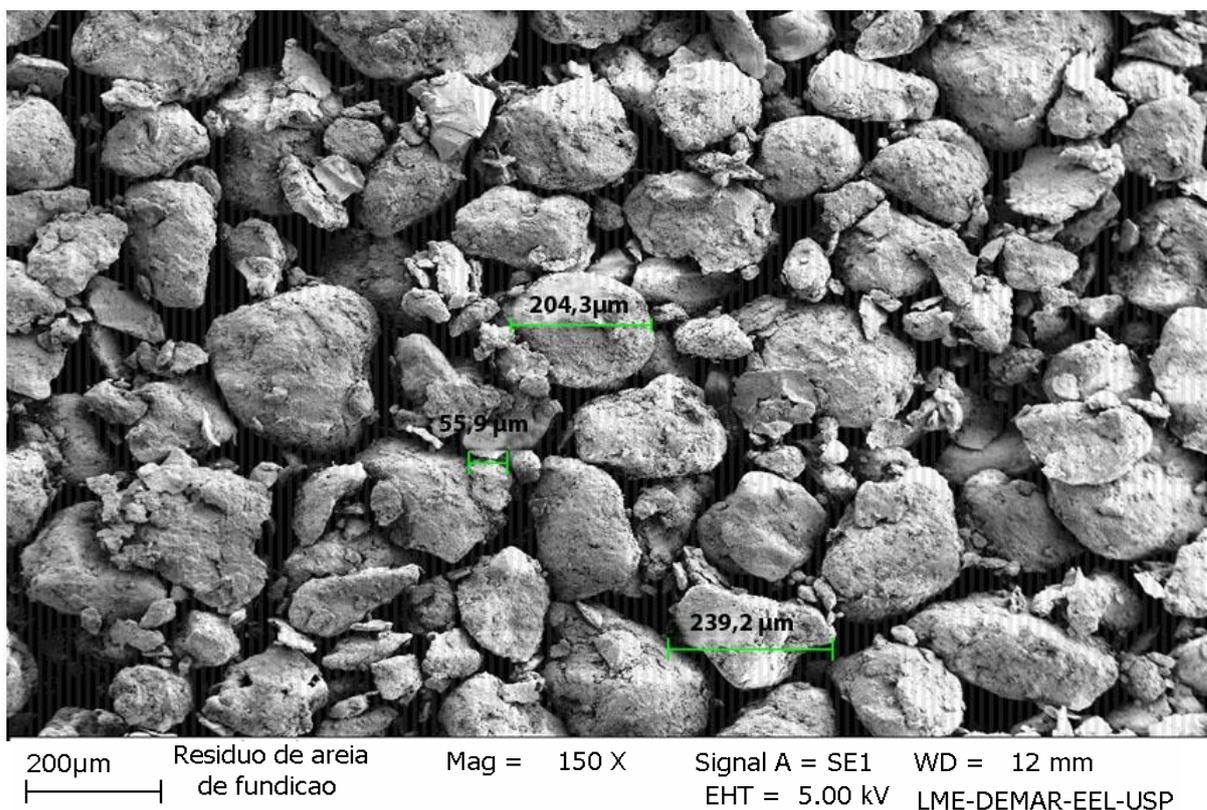


Figura 4.4 – MEV por elétron secundário: grãos de ADF – Aumento 150x

Observa-se que fora constatado o preconizado por Guney *et al.* (2010) segundo os quais o uso de resíduos de areia de fundição no concreto diminui os espaços vazios no mesmo. As figuras 4.3 e 4.4 apresentam que os vazios entre as partículas com dimensões maiores (250 μm) são preenchidos por partículas com dimensões menores (55 μm). Por consequência, os valores de absorção de água irão possuir uma tendência de diminuir nas amostras com resíduos de areia de fundição em proporção maiores que 5%, conforme Guney *et al.* (2010).

4.4 Cálculos dos volumes dos componentes do concreto

Partindo da exigência da norma ABNT NBR 9781(ABNT, 1987) de que a resistência mínima do concreto para pavimento deve ser de 35 MPa, seguiu-se os cálculos para determinação do volume de cimento, dos agregados miúdos e graúdos e do volume de água. O cálculo detalhado do traço do concreto encontra-se no Anexo 7.1 do presente estudo. A Tabela 4.2 apresenta os traços, em massa resultante da dosagem para esta pesquisa.

Tabela 4.2 – Relação proporcional (em massa e parâmetros de dosagem dos concretos executados)

Relação A/C	Teor de Adição	Cimento	Agregado Miúdo – AN Areia natural	Adição ADF	Agregado Graúdo B1 Brita nº1	Consumo Cimento
0,52	0%	1	2,14	0	2,84	400
0,52	10%	1	1,93	0,21	2,84	400
0,52	20%	1	1,71	0,43	2,84	400

Observa-se que a proporção A/C resultou em valor próximo ao obtido por Guney *et al.* (2010), de 0,45, cujas estruturas estariam inclusive expostas a situações climáticas de congelamento-descongelamento. As moldagens dos corpos de prova de concreto, cilíndrico e prismático 10 x 20 cm, foram de acordo com as recomendações da ABNT NBR 5738 (ABNT, 1994).

4.4.1 Propriedades do concreto

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam respectivamente para os fatores A/C 0,50 e 0,52, os valores em massa (kg) dos componentes do concreto, cujos cálculos detalhados estão apresentados no Anexo 7.2. A Tabela 4.5 apresenta a discriminação dos corpos de prova aleatorizados e identificados para os ensaios.

Tabela 4.3–Proporção em massa (kg) dos componentes do concreto

			Cimento	AN + ADF	B1	Água
Ensaio 1	Referência	8 Corpos de Prova	5,90	12,55	16,64	2,95
	10% ADF	8 Corpos de Prova	5,90	11,30 + 1,25	16,64	2,95
	20% ADF	8 Corpos de Prova	5,90	10,04 + 2,51	16,64	2,95

			Cimento	AN + ADF	B1	Água
Réplica	Referência	8 Corpos de Prova	5,90	12,55	16,64	2,95
	10% ADF	8 Corpos de Prova	5,90	11,30 + 1,25	16,64	2,95
	20% ADF	8 Corpos de Prova	5,90	10,04 + 2,51	16,64	2,95

Quando foi executado o traço de concreto programado conforme tabela 4.3, encontrou-se um concreto muito consistente com relação ao estado fresco. Para que a faixa de abatimento adotada fosse mantida foi necessário acrescentar água e conseqüentemente mais cimento para obter uma massa homogênea e adensável, passando o fator A/C de 0,50 para 0,52.

O resultado de tal correção encontra-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4—proporção em massa (kg) dos componentes do concreto com o fator água/cimento corrigido (0,52).

			Cimento	AN + ADF	B1	Água
Ensaio 1	Referência	8 Corpos de Prova	6,40	12,55	16,64	3,35
	10% ADF	8 Corpos de Prova	6,40	11,30 + 1,25	16,64	3,35
	20% ADF	8 Corpos de Prova	6,40	10,04 + 2,51	16,64	3,35
Replica	Referência	8 Corpos de Prova	6,40	12,55	16,64	3,35
	10% ADF	8 Corpos de Prova	6,40	11,30 + 1,25	16,64	3,35
	20% ADF	8 Corpos de Prova	6,40	10,04 + 2,51	16,64	3,35

Tabela 4.5- Tabela dos ensaios aleatorizada e identificada

			CIMENTO	AGREGADO MIÚDO		BRITA 1	ÁGUA	Nº	ALEATÓRIO	ID
				AN	ADF					
ENSAIO 1	REF	8 CP	6,4	12,55	0	16,64	3,35	1	3º	3/1
	10% ADF	8 CP	6,4	11,3	1,25	16,64	3,35	2	1º	1/1
	20% ADF	8 CP	6,4	10,04	2,51	16,64	3,35	3	2º	2/1
RÉPLICA	REF	8 CP	6,4	12,55	0	16,64	3,35	1	3º	3/2
	10% ADF	8 CP	6,4	11,3	1,25	16,64	3,35	2	1º	1/2
	20% ADF	8 CP	6,4	10,04	2,51	16,64	3,35	3	2º	2/2

4.5 Análise dos Resultados

Os resultados são compostos pelos valores obtidos nos ensaios de concreto no estado fresco e no estado endurecido.

4.5.1 Concreto no estado fresco

Os resultados dos abatimentos dos concretos executados– *Slump* Teste, estão apresentados na Tabela 4.6. Pode-se observar, pela diminuição dos valores do abatimento nos concretos com 10% e 20% de adição, que houve um pequeno incremento na coesão e consistência, com a adição da ADF. O efeito das pequenas partículas de ADF difundidas pela mistura atua como uma barreira física para o movimento ascendente da água, causando a diminuição da exsudação o que pode ser a causa da dificuldade de homogeneização da mistura. Tais análises corroboram com as mencionadas por Guney *et al* (2010).

Tabela 4.6 – Valores de abatimentos dos concretos executados

DATA	IDENTIF.	CONCRETO	TEMP.AMB.	UMIDADE	SLUMP mm
06/11/12	1/1	10%	28°C	90%	25
06/11/12	2/1	20%	28°C	92%	20
06/11/12	3/1	REF	28°C	93%	30
07/11/12	1/1	10%	28°C	92%	25
07/11/12	2/1	20%	28°C	93%	25
07/11/12	3/1	REF	28°C	94%	30

4.5.2 Análise dos Resultados de Resistência à Compressão Axial

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova, para cada tipo de concreto mistura e para os tempos de cura de 7 e

28 dias. Apresentam-se os valores máximos de carga suportada por cada corpo de prova e apresentadas as médias das cargas (em Kgf) e a média das tensões máximas (em MPa).

Tabela 4.7 – Ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova

Tempo (dias)	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL						
	Identificação	CP	Ensaio (kgf)			Média (Kgf)	Tensão 3 (MPa)
			1	2	3		
7 dias	1/1	10% ADF	24037	30120	28855	27671	35,23
	2/1	20% ADF	27081	25814	26067	26321	33,51
	3/1	REF	25306	25053	27588	25982	33,08
	1/2	10% ADF	28348	26574	28095	27672	35,23
	2/2	20% ADF	23783	23529	24545	23952	30,50
	3/2	REF	22767	27335	25560	25221	32,11
28 dias	1/1	10% ADF	33911	30879	24545	29778	37,91
	2/1	20% ADF	31132	29867	27841	29613	37,70
	3/1	REF	28855	26067	28349	27757	35,34
	1/2	10% ADF	31132	32143	29614	30963	39,42
	2/2	20% ADF	28095	26574	26067	26912	34,26
	3/2	REF	27081	29108	27335	27841	35,45

A figura 4.5 mostra o comportamento dos concretos quanto à resistência à compressão axial em função do teor de adição de ADF aos 7 e 28 dias.

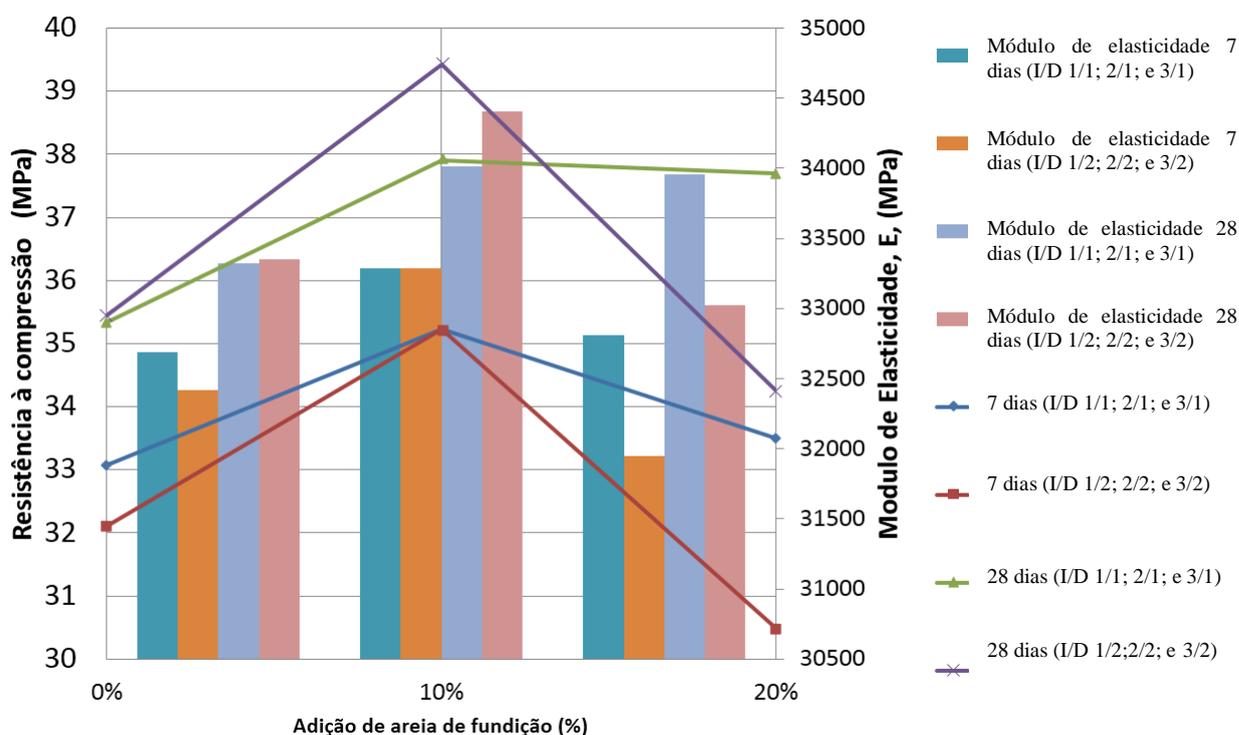


Figura 4.5 – Resistência média para os corpos de prova com 7 e 28 dias de cura

A análise da resistência à compressão do concreto e conseqüentemente, do módulo de elasticidade do concreto, mostraram-se aumentar para 10% de adição de areia de fundição e diminuiu quando a adição foi de 20%, porém os valores permaneceram maiores quando comparados com o de controle (0% de adição de ADF). Também, os valores de resistência à compressão aumentaram com a idade de 7 para 28 dias. Estes resultados foram equivalentes aos preconizados por Guney *et al.* (2010), Singh e Siddique (2012) segundo os quais a resistência à compressão aumentou com a idade e segundo Siddique *et al.* (2009), aumentaram com o acréscimo na adição de areia de fundição. Entretanto, os resultados Basar e Aksoy (2012) e Guney *et al.* (2010) indicaram que a adição de areia de fundição como substituição parcial de areia natural levou à redução no desempenho de resistência e densidade e também aumentou a proporção de absorção de água do concreto. No entanto, o concreto com 20% de adição de areia de fundição apresentou resultados quase semelhantes com o concreto controle. Isto também fora observado no presente estudo, pois os valores de 0% de adição e de 20% de adição de areia de fundição foram semelhantes (figura 4.5 e tabela 4.7).

Do ponto de vista estatístico, e com os valores das tensões apontados na Tabela 4.7 para as idades de 7 e 28 dias, através da análise estatística por meio do ANOVA foi constatado que não houve significância estatística dos resultados sobre a resistência à compressão axial.

Tensão aos 7 dias <i>versus</i> mistura					
Source	DF	SS	MS	F	Pvalue
Mistura	2	11,79	5,90	3,54	0,162
Error3	5,00	1,67			
Total	5	16,8			

S = 1,291 R-Sq = 70,23 % R-Sq (adj) = 50,38%

Pooledstdev = 1,291

Tensão aos 28 dias <i>versus</i> mistura					
Source	DF	SS	MS	F	Pvalue
Mistura	2	12,16	6,08	2,58	0,223
Error3	7,06	2,35			
Total	5	19,23			

S = 1,534 R-Sq = 63,26% R-Sq (adj) = 38,77%

PooledStDev = 1,534

4.5.3 Análise dos Resultados da Absorção por Imersão e Índice de Vazios

A tabela 4.8 apresenta os valores obtidos nos ensaios de absorção por imersão aos 35 dias e o índice de vazios.

Tabela 4.8 – Tabela Resultados Ensaio Absorção Por Imersão (35 d) e Índice de Vazios

Mistura	Massa Seca Estufa 72h	Massa Saturada Imersa Água 72h	Massa Imersa Água Balança Hidrostát.	Absorção p/Imersão % (35 d)	Índice Vazios %	Massa Específica Amostra Seca	Massa Específica Amostra Saturada
REF	3600	3812	2230	5,89	13,40	2,28	2,41
10%	3655	3852	2282	5,39	12,55	2,33	2,45
20%	3582	3797	2230	6,00	13,72	2,29	2,42
REF	3575	3782	2225	5,79	13,29	2,30	2,43
10%	3602	3812	2242	5,83	13,38	2,29	2,43
20%	3595	3815	2235	6,12	13,92	2,28	2,41

Como em Guney *et al.* (2010), ao verificar a tabela 4.8, observa-se que as proporções de absorção de água dos corpos de prova com 10% de resíduos de areia de fundição e os corpos de prova sem resíduos areia de fundição são próximos uns dos outros. Guney *et al.* (2010), observaram que os valores de absorção de água possuem uma tendência para diminuir nos corpos de prova com quantidade de resíduos de areia de fundição maiores que 5%. Já os corpos de prova com 20% de adição de areia de fundição apresentaram valores maiores para capacidade de absorção que as de controle (6,00 e 6,12). Isto talvez explique o decréscimo do valor de resistência à compressão (embora tenha retornado aos valores próximos a 0% de adição) quando da aplicação de 20% de areia de fundição. Talvez o decréscimo na resistência à compressão tenha sido devido ao mesmo fato observado por Kathib *et al.* (2013) em razão de um aumento na absorção de água por capilaridade e uma diminuição na resistência à compressão.

Acredita-se, ao relacionar os valores de resistência à compressão do concreto e de absorção de água, que houve um decréscimo do valor do primeiro em função do aumento do valor da segunda variável, apesar da análise estatística constatar que não houve significância estatística dos resultados sobre a absorção por imersão entre si, para os concretos com 0%, 10% e 20% de adição de ADF, por meio da análise teste estatístico ANOVA foi (Figura 4.6) e de índices de vazios (Figura 4.7).

Absorção <i>versus</i> mistura					
Source	DF	SS	MS	F	Pvalue
Mistura	2	0,2025	0,1013	2,79	0,207
Error3	0,1090	0,0363			
Total	5	0,3115			

S = 0,1906 R-Sq = 65,01% R-Sq (adj) = 41,69%

PooledStDev = 0,1906

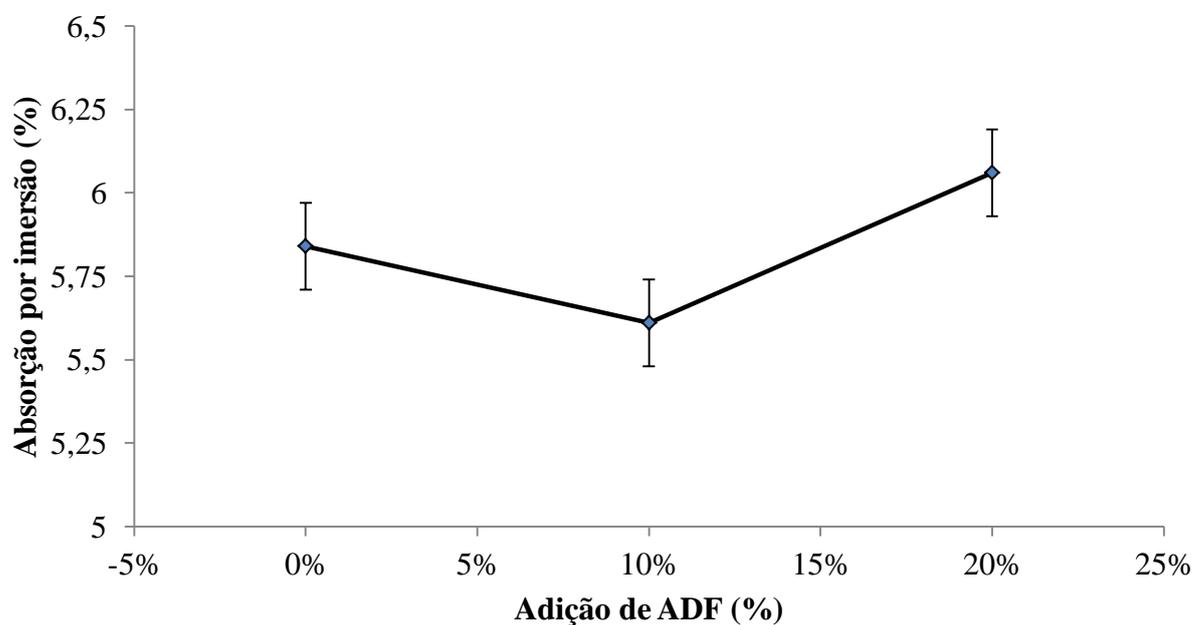


Figura 4.6 - Variação absorção por imersão quanto à concentração de ADF nos CP.

Índices de Vazios <i>versus</i> mistura					
Source	DF	SS	MS	F	Pvalue
Mistura	2	0,734	0,367	2,79	0,194
Error3	0,371	0,124			
Total	5	1,105			

S = 0,3514 R-Sq = 66,46% R-Sq (adj) = 44,09%

PooledStDev = 0,351

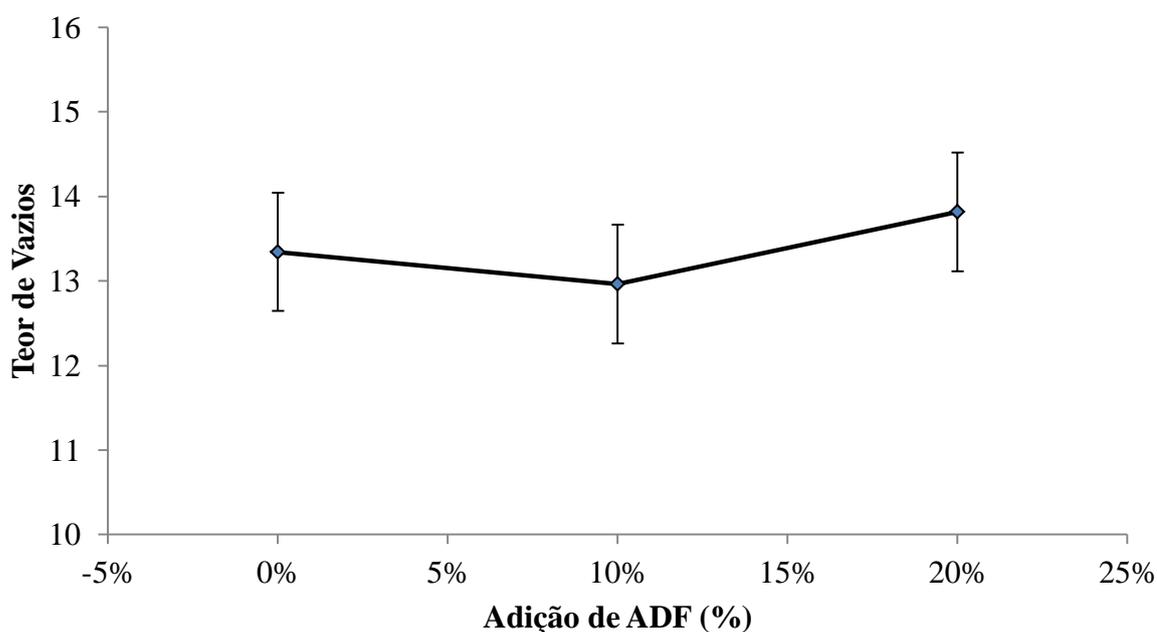


Figura 4.7 - Variação do teor de vazios quanto à concentração de ADF nos CP.

4.5.4 Análise dos Resultados de Microscopia Ótica

As análises da microestrutura dos corpos de prova, com substituição 0%, 10% e 20% de ADF por areia natural, realizada através de microscopia ótica (estereoscopia) no LMM- Laboratório de Metalurgia e Materiais da UNIFEI- Itajubá, mostraram uma boa distribuição das partículas de ADF na matriz e uma boa coesão entre as partículas de ADF, a areia convencional e a brita (figuras 4.8 a 4.10). Assim, corroborando o preconizado por Siddique e Singh (2011), segundo os quais a estrutura coesa entre as partículas da ADF conferem maior resistência ao material.

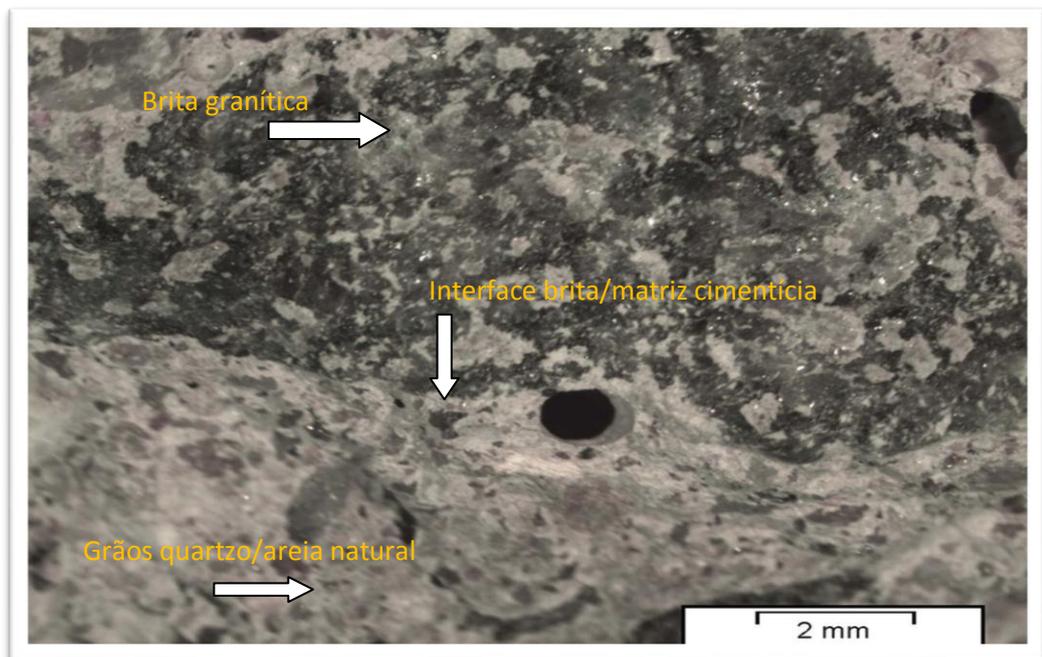


Figura 4.8 – Estereoscopia corpo de prova 0% de ADF – Aumento 10x

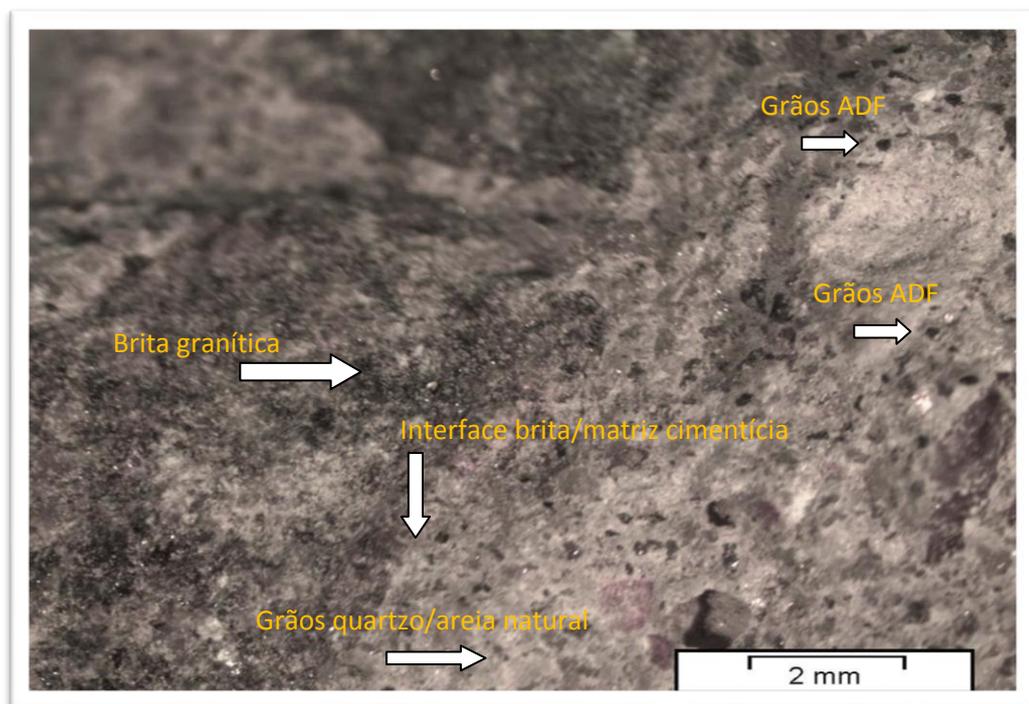


Figura 4.9 – Estereoscopia corpo de prova com 10% de ADF – Aumento 10x

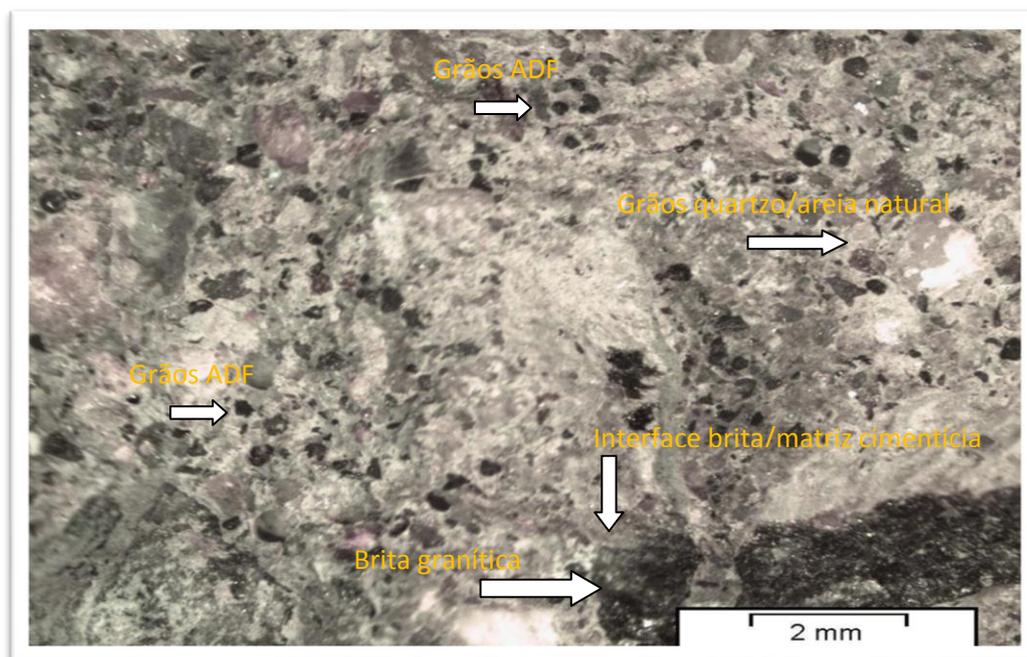


Figura 4.10 – Estereoscopia corpo de prova com 20% de ADF – Aumento 10x

4.5.5 Análise dos Resultados Quanto a Periculosidade

É possível verificar, analisando a Tabela 4.9, acerca dos resultados dos ensaios de lixiviação/solubilização realizados nos fragmentos dos corpos de prova, que quanto à periculosidade a classificação foi:

Classe II A – Resíduo Não Perigoso Não Inerte

Tabela 4.9 – Parâmetros químico no Lixiviado e Solubilizado da ADF pela NBR 10004

Parâmetros	Lixiviado (mg/L)			Solubilizado (mg/L)		
	NBR 10005			NBR 10006		
	Resultados		VMP ¹	Resultados		VMP ¹
	10%	20%		10%	20%	
Alumínio				0,30	0,20	0,2
Arsênio	< LQ	< LQ	1	< LQ	< LQ	0,01
Bário	0,42	0,37	70	0,29	0,23	0,7
Cádmio	< LQ	< LQ	0,5	< LQ	< LQ	0,005
Chumbo	< LQ	< LQ	1	< LQ	< LQ	0,01
Cianetos				0,016	0,018	0,07
Cloretos				5,42	3,92	250
Cobre				< LQ	< LQ	2,0
Cromo Total	0,005	0,04	5	0,005	0,01	0,05
Fenóis Totais				0,02	0,011	0,01
Ferro				<0,005	<0,005	0,3
Fluoretos	0,16	1,53	150	0,16	0,2	1,5
Manganês				< LQ	< LQ	0,1
Mercúrio	< LQ	< LQ	0,1	< LQ	< LQ	0,001
Nitrato(expresso em N)				1,39	1,15	10,0
Prata	< LQ	< LQ	5,0	< LQ	< LQ	0,05
Selênio	< LQ	< LQ	1,0	0,002	0,002	0,01
Sódio				24,1	26,5	200
Sulfato (expresso em SO ₄)				1,85	32,8	250
Zinco				< LQ	< LQ	5,0

Nota: 1) ENSAIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS
NORMA: ABNT/NBR 10004:2004 - RESÍDUOS SÓLIDOS (CLASSIFICAÇÃO)
realizados pela TASQA Serviços Analíticos Ltda. – Paulínia-SP

Coutinho Neto e Fabri (2004) avaliaram o uso da areia de fundição reutilizando-a na composição dos agregados para concreto asfáltico. A areia de fundição e a mistura asfáltica com este material incorporado foram classificados, respectivamente, como resíduos Não-inerte e Inerte. Corroborando com este estudo, os resultados apresentados por TASQA- Serviços Analíticos Ltda. (2013) referente aos resíduos dos corpos de prova dos concretos com adição de 10% e 20% de ADF, confirmaram a classificação como resíduo classe II – Não Perigoso Não Inerte, em virtude das concentrações para os parâmetros fenóis e alumínio que ultrapassaram os limites máximos no extrato para o teste de solubilização (Anexo G da norma ABNT/NBR 10004:2004).

No estudo de Monosi *et al.*(2013) o ensaio de lixiviação foi realizado mantendo a integridade da amostra e o presente estudo realizou o ensaio em fragmentos dos corpos de prova que foram triturados. Como em Monosi *et al.* as concentrações de Alumínio apresentaram concentrações acima do limite máximos definidos na norma ABNT 2004:10004.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

As conclusões apresentadas neste estudo foram em função dos resultados apresentados no programa experimental usando os materiais, dosagens e técnicas de execução específicas.

Os resultados dos testes de compressão axial e de absorção por imersão dos concretos, referência e com adição de 10% e 20% de ADF, apresentaram valores compatíveis com os esperados, apresentando ganhos sensíveis nos concretos com adição, conforme tabelas 4.6 e 4.7. Porém, através do teste estatístico ANOVA, foi constatada que não houve significância estatística das variáveis relacionadas, teor de adição de ADF e a idade, para a resistência à compressão axial, a absorção por imersão e ao índice de vazios.

As análises da microestrutura dos corpos de prova mostraram uma boa distribuição das partículas de ADF na matriz e uma boa coesão entre as partículas de ADF, a areia convencional e a brita.

Portanto, a partir dos resultados obtidos no programa experimental, pode-se afirmar que o uso de ADF como substituição de parte do agregado miúdo no concreto é viável tecnicamente e que concretos produzidos com ADF possuem desempenho mecânico semelhante aos dos concretos convencionais.

Como os percentuais de adição de ADF não apresentaram diferenças significativas nos resultados, o uso de 20% de adição apresenta-se como o teor ótimo para ajudar a reduzir o volume de descarte.

5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Com o objetivo de viabilizar tecnicamente o uso da ADF como adição em concreto, realizar novas pesquisas e que levem em consideração os seguintes aspectos:

- Avaliar a influência da adição de ADF na porosidade e na penetração de cloretos e outros parâmetros de durabilidade.
- Realizar os ensaios com adição de 20% de ADF no concreto usado diretamente em peças de pavimento intertravado para comparar com os resultados encontrados nos corpos de prova cilíndricos.
- Avaliar a influência da adição de ADF em concreto estrutural armado.

CAPÍTULO 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **agregados para concreto**: especificação. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 9780: **peças de concreto para pavimentação** – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 9781: **peças de concreto para pavimentação**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 67: **concreto**: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1988.

_____. NBR 5733: **cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 12672: **areia- padrão para ensaios em fundição**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 15984: **areia descartada de fundição** – central de processamento, armazenamento e destinação (CPDA). Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 12634: **areia base para fundição** – determinação de permeabilidade. Rio de Janeiro, 1993.

_____. NBR 7215: **cimento Portland**: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR NM 23: **cimento Portland e outros materiais em pó**: determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 248: **agregados**: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 10004: **resíduos sólidos** – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10005: **procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10006: **procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10007: **amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 9778: **argamassas e concretos endurecidos**: determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 45: **agregados**: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 5739: **concreto**: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 5738: **concreto**: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 52: **agregado miúdo**: determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 53: **agregado graúdo**: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 15702: **areia descartada de fundição** – diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 9767: **areias para fundição** – determinação do teor de argila total ou argila AFS – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **ABNT/CB-59 – Fundição**. Disponível em: <<http://abnt.iso.org/livelihood/livelihood/fetch/14025021/cb59.pdf?nodeid=14091744&vernum=0>>. Acesso em 04 de abril de 2013.
ABIFA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. Soluções para as Areias descartadas de Fundição – ADF. **Revista Fundição & Matérias-primas**, 98º ed., São Paulo, Julho, 2008.

_____. Índices de Mercado, Distribuição Regional de Mercados- www.abifa.org.br, acesso em outubro de 2012.

ADEGAS, Roseane Gonçalves. **Perfil Ambiental dos Processos de Fundição Ferrosa que utilizam Areias no Estado do Rio Grande do Sul**. 108 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Escola de Engenharia, UFRGS, 2007.

A NOTÍCIA – JOINVILLE – Fundema Notifica Fundição. Disponível em <<http://www.clicrb.com.br/anoticia/jsp/default2.jsp?uf=2&local=18&source=350336>>, acesso em 17/11/2011

BARROS, Regina Mambeli. Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade / Regina Mambeli Barros. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2012

BASAR, H. MERVE; AKSOY, NURAN DEVECI. 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**, vol. 35, 2012, p. 508–515

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: ed. LTC, 2000

BONIN, André Luís. Reutilização da Areia Preta de Fundição na construção civil. Congresso de Fundição. São Paulo, p-203-221. Setembro, 1995.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 313/2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. **Diário Oficial da União**, nº 226, Seção I, p. 85-91. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2002_313.pdf> Acesso em 19 de abril de 2013.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral-SGM. Relatório Técnico 61 – Perfil da Fundição. 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_transformacao_mineral_no_brasil/P35_RT61_Perfil_da_Fundicao.pdf> Acesso em 05 de junho de 2013

CARNIN, Raquel Luísa Pereira. **Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Mistura Asfáltica**. 2008, Tese de Mestrado. Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná.

CARNIN, Raquel Luísa Pereira; SILVA, Cláudio de Oliveira; POZZI, Ricardo José; CARDOSO JÚNIOR, Dirceu; FOLGUERAS, Marilena Valadares; MAIKOWSKI, Wendel. **Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado**. Artigo Técnico, Revista PAVIMENTAÇÃO ANOV/out./nov./dez. de 2010, 57-67.

CASOTTI, Bruna Pretti; BEL FILHO, Egmar Del; CASTRO, Paulo Castor. P.C. Indústria de Fundição: Situação Atual e Perspectivas, Metalúrgica, BNDS Setorial, nº 33, p-121-162. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes/pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3304.pdf>>

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. DECISÃO DE DIRETORIA Nº 152/2007/C/E, de 08 de agosto de 2007. Dispõe sobre procedimentos para gerenciamento de areia de fundição. Atualizada com o texto da Errata nº1, **Diário Oficial Estado de São Paulo**, Caderno Executivo I (Poder Executivo, Seção I), 03/04/2008, p. 51.

COUTINHO NETO, B; FABBRI, G.T.P. **Avaliação da reutilização da areia de fundição em misturas asfálticas densas do tipo CAUQ**. Revista Transportes, vol.XII, 2004, pg.50-57.

DECISÃO DE DIRETORIA Nº 152/2007/C/E. **Procedimentos para Gerenciamento de areia de Fundição**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental- Cetesb. São Paulo, 2007;16 p.

D'ELBOUX, Francisco Augusto. **Minimização de descarte de areias de Fundição**. 2000, Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Metodista de Piracicaba.

GARCIA FILHO, Fábio; CARNIN, Raquel Luísa. **Panorama do descarte de Areia de Fundição**. IN: SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO, 6, São Paulo, nov2006, Associação Brasileira de Metalurgia Materiais e Mineração – ABM. Disponível em www.abmbrasil.com.br/cim/download/semfundicao20-17h30.pps> Acesso em 03 out. 2013.

GUNEY, YUCEL; SARI, YASIN DURSUN; YALCIN, MUHSIN; TUNCAN, AHMET; DONMEZ, SENAYI. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. **Waste Management**, Vol. 30, n. 8–9, 2010, p. 1705–1713

MINAS GERAIS. lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. **Diário do Executivo – “Minas Gerais”**, DE 13 DE JANEIRO DE 2009. Disponível em:<<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=9272>>. Acesso em 19 de abril de 2009.

MINITAB INC. MINITAB Statistical Software, versão 14. 2003. 1 CD ROM

MONOSI, SAVERIA; TITTARELLI, FRANCESCA; GIOSUÈ, CHIARA; RUELLO; MARIA LETIZIA. Effect of two different sources and washing treatment on the properties of UFS by-products for mortar and concrete production. **Construction and Building Materials**, Vol. 44, 2013, p. 260–266

Monosi,Savera; Tittarelli,Francesca; Giosuè,Chiara; Ruello,Maria Letizia. Effect of two different sources and washing treatment on the properties of UFS by-products for mortar and concrete production. **Construction and Building Material**, v10-44,2013,p.260-267.

PARK, CHONG-LYUCK; KIM, BYOUNG-GON; YU, YOUNGCHUL. The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 203– 204, 2012, p. 176– 182

SANTA CATARINA. CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – CONSEMA. Resolução CONSEMA Nº. 011, de 26 de agosto de 2008. Estabelece critérios para a utilização da Areia Descartada de Fundição (ADF) de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural. Disponível em:<ww.fatma.sc.gov.br > [Início Downloads](#) > [Legislação](#)>. Acesso em 08 de abril de 2013.

SÃO PAULO. Lei Estadual nº 12.300, de 16 de março de 2006. Institui a Política Estadual de **Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes**. Disponível em:<<http://www.ambiente.sp.gov.br/wp/cpla/files/2011/05/PERS.pdf>>. Acesso em 19 de abril de 2013.

SCHEUNEMANN, Ricardo. **Regeneração de Areia de Fundição Através de Tratamento Químico Via Processo Fenton**, 2005, Dissertação de Mestrado. Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina.

SIDDIQUE, RAFAT; DE SCHUTTERB, GEERT; NOUMOWEC, ALBERT. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, Vol. 23, n. 2, 2009, p. 976–980

SIDDIQUE, RAFAT; SINGH, GURPREET. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol.55, p. 885-892, 2011

SINGH, GURPREET; SIDDIQUE, RAFAT. 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**, Vol. 26, 2012, p. 416–422

7 ANEXOS

Anexo 7.1 Cálculo do traço do concreto

Foi utilizada a equação 3.1, reescrita para facilidade de leitura nesta seção.

$$F_{cj} = F_{ck} + 0,84 \cdot S_d \quad (3.1)$$

$$F_{cj} = 35 + 0,84 \times 5,5 = 41,34$$

Da curva de Abrams para o cimento Holcim CPV ARI Plus, encontrou-se para $F_{cj} = 41,34$ MPa, o fator $A/C = 0,50$.

Para determinação da consistência, foram considerados como parâmetros: o diâmetro máximo da brita (19 mm); adensamento vibratório enérgico; e *slump* provável 0 – 5 cm. Foram encontrados como volume de água, 183 l/m³ e porcentagem aproximada de ar existente no concreto, o valor de 2%.

a) Determinação do volume do cimento, sendo

$$\gamma_{\text{cim}} = 3,11 \text{ g/cm}^3$$

$$X = A/\text{cim} \Rightarrow \text{cim} = A/X = 183/0,50 = 366 \text{ Kg cim/ m}^3 \text{ concreto}$$

$$\gamma = M/V \Rightarrow V = M/\gamma = 366/3,11 = 117,68 \text{ l cim/m}^3 \text{ concreto}$$

b) Determinação de volume agregado

$$V_{\text{concr}} = V_{\text{cim}} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{ar}} + V_{\text{agreg}}$$

$$V_{\text{agreg}} = V_{\text{concr}} - V_{\text{cim}} - V_{\text{H}_2\text{O}} - V_{\text{ar}}$$

$$V_{\text{agreg}} = 1000 - 117,68 - 183,0 - 20,0 = 679,32 \text{ l agr / m}^3 \text{concr}$$

c) Determinação do volume aparente do agregado graúdo compactado a seco por m³ concreto.

Sendo módulo finura da areia = 2,21 e $D_{\text{maxagr}} = 19\text{mm}$

$$\text{Volume aparente} = 0,65 \Rightarrow 650 \text{ l/m}^3 \text{ concreto}$$

Volume absoluto do agregado graúdo

$$M_{\text{uCS}} = M_{\text{agGr}} / V_{\text{ap}} \Rightarrow M_{\text{agGr}} = M_{\text{u}} \times V_{\text{ap}} = 1,60 \times 650 \text{ l} = 1040 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{\text{agGr}} = 1040 \text{ kg/m}^3 \text{ concreto}$$

d) Volume absoluto do agregado graúdo

$$V_{B1} = M_{B1} / \gamma_{B1} = 1040 / 2,73 = 380,95 \text{ l/m}^3 \text{ concreto}$$

e) Volume absoluto de agregado miúdo

$$V_{\text{areia}} = V_{\text{agr}} - V_{B1}$$

$$V_{\text{areia}} = 679,32 - 380,95 = 298,37 \text{ l/m}^3 \text{ concreto}$$

$$\text{Massa areia} = 298,37 \times 2,63 = 784,71 \text{ Kg/m}^3 \text{ concreto}$$

Índice de granulometria = a/m, que é a relação entre a areia e o agregado total, onde
 $m = \text{areia} + \text{brita}$, logo = $784,71 / 784,71 + 1040 = 0,43$

f) Logo o traço em massa foi:

cim + areia + brita 1 + H₂O

$$366 + 784,71 + 1040 + 183$$

Traço unitário: 366 / 366: 784,71 / 366: 1040 / 366: 183 / 366

$$1 : 2,14 : 2,84 : 0,50$$

Anexo 7.2 Cálculo da quantidade dos componentes do concreto (em massa) utilizada

Cálculo inicial

Os valores encontrados para confecção do concreto encontram-se descritos a seguir.

Considerando o traço em massa para 1 m³ de concreto:

cimento + areia + brita 1 + H₂O

366 + 784,71 + 1040 + 183

E considerando que foram moldados 8 corpos-de-prova cilíndricos de 10x20cm para cada traço de referência, com 10% e 20% de ADF e considerando o volume de cada cilindro de 1,57l obteve-se 8 x 1,57 l= 12,56l,

Considerando as perdas que iriam ocorrer foi elaborado um volume de 16 l para cada- traço, ou seja, 0,016m³, logo o traço unitário foi:

cimento + areia + brita 1 + H₂O

5,90 +12,55 + 16,64 + 2,95

Cálculo da correção para um concreto mais adensável

Água 183 l ----209 l

Cimento 366 kg --- 400 kg

A/C= 209/400= 0,52

Assim, considerando o traço em massa para 1 m³ de concreto:

cimento + areia + brita 1 + H₂O

400 + 784,71 + 1040 + 209

Para o traço em massa de 0,016 m³

cimento + areia + brita 1 + H₂O

6,40 +12,55 + 16,64 + 3,35

Anexo 7.3 Relatório de Ensaio do Cimento CPV Ari Plus Holcim (Holcim)

ENSAIOS		PERÍODO	23.08.2012	11.09.2012	29.09.2012	18.10.2012	LIMITES NBR5733
			08.09.2012	27.09.2012	16.10.2012		
RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO							
TIPO / CLASSE : CP V ARI PLUS							
FABRICA PEDRO LEOPOLDO							
ENSAIOS FÍSICOS							
# 400 (%)	Média		2,3	2,2	2,6		
	Desv. Pad. Nº Amostras		0,58 8	0,40 8	0,36 8		
IT Holcim							
# 325 (%)	Média						
	Desv. Pad. Nº Amostras						
NBR 9202							
Blaine (cm ² /g)	Média		4803	4772	4846		≥ 3000
	Desv. Pad. Nº Amostras		69 8	102 8	70 8		
NBR NM 76							
Início Pega (min)	Média		128	121	131		≥ 60
	Desv. Pad. Nº Amostras		12 8	9 8	5 8		
NBR NM 85							
Fim Pega (min)	Média		181	177	184		≤ 600
	Desv. Pad. Nº Amostras		12 8	6 8	6 8		
NBR NM 85							
Exp. Quente (mm)	Média						≤ 5
	Desv. Pad. Nº Amostras						
NBR 11582							
R 1 dia (MPa)	Média		30,5	29,0	29,0		≥ 14,0
	Desv. Pad. Nº Amostras		1,11 8	0,77 8	0,83 8		
NBR 7215							
R 3 dias (MPa)	Média		42,0	40,9	41,2		≥ 24,0
	Desv. Pad. Nº Amostras		1,01 8	0,65 8	0,54 8		
NBR 7215							
R 7 dias (MPa)	Média		45,7	45,0	44,9		≥ 34,0
	Desv. Pad. Nº Amostras		0,49 8	0,67 8	0,44 7		
NBR 7215							
R 28 dias (MPa)	Média		53,2	52,5			
	Desv. Pad. Nº Amostras		0,48 8	0,31 6			
NBR 7215							
ANÁLISE QUÍMICA (%)							
PF 1000°C	NBR NM 18		3,74	3,93	3,93		≤ 4,5
SiO ₂	NBR 14656		18,91				
R.I.	NBR NM 15		0,84	0,90	0,75		≤ 1,0
Al ₂ O ₃	NBR 14656		4,93				
Fe ₂ O ₃	NBR 14656		2,90				
CaO	NBR 14656		63,50				
MgO	NBR 14656		0,76	0,73	0,73		
SO ₃	NBR 14656		2,91	2,93	2,87		≤ 4,5
CO ₂	NBR NM 20		2,54	2,68	2,80		≤ 3,0
K ₂ O	NBR 14656		0,88				
PF 500°C	IT Holcim		0,92	0,90	0,80		
C ₃ A (Teórico)	Equação Bogue		7,33	7,70	7,77	7,67	
OBSERVAÇÕES:							
1. IT = Instrução de Trabalho							
2. Resíduo na peneira #200: ≤ 6,0% (NBR 11579)							
							
						Eng. Alexandre Batista Ribeiro Coordenador Técnico MG	
APL0_CP_V_ARI_PLUS_VENDAS.xls			26 outubro, 2012				