

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ- UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
MATERIAIS

MESTRADO PROFISSIONAL

MARIA AUXILIADORA DE BARROS MARTINS

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DA AREIA RETIDA NO
SISTEMA DE EXAUSTÃO - DE UMA INDÚSTRIA DE
AUTOPEÇAS - EM CONCRETO CONVENCIONAL**

Itajubá, dezembro de 2016.

MARIA AUXILIADORA DE BARROS MARTINS

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DA AREIA RETIDA NO SISTEMA DE
EXAUSTÃO - DE UMA INDÚSTRIA DE AUTOPEÇAS - EM CONCRETO
CONVENCIONAL.**

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

Área de Concentração: Desenvolvimento, Processamento e Caracterização de Materiais.

Itajubá, dezembro de 2016

Dedico este trabalho aos meus pais, Edmar Martins e Ivone T. de Barros Martins, (in memoriam). Minha mãe foi grande educadora e meu maior exemplo de fé e perseverança.

“Mas todo aquele que vos honra tem a certeza de que sua vida, se for provada, será coroada: que depois da tribulação haverá a libertação, e que se houver castigo, haverá também acesso à misericórdia” (Tobias, 3, 2)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela presença e fidelidade nos momentos mais difíceis.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Regina Mambeli Barros, pela confiança e por sempre me impulsionar com sua humildade e dedicação.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Gilbert Silva, pelo apoio, incentivo e por sempre valorizar o meu trabalho.

Aos professores Dr. Geovani Rodrigues, Dr^a. Valquíria Claret dos Santos e Dr. Valdir Schalch, que fizeram parte da banca de qualificação e defesa e muito acrescentaram com seus conhecimentos.

À Universidade Federal de Itajubá, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Aos professores do mestrado que contribuíram para meu crescimento científico e intelectual juntamente aos meus colegas que me acolheram.

Aos meus filhos, Isabella, Rafael e Renata, meus grandes amores, por estarem sempre do meu lado e serem a razão de todo meu esforço.

Aos técnicos do laboratório de Materiais de Construção Civil da UNIFEI, Fabiano Nazário e Oswaldo Rodrigues, que muito me ajudaram nos experimentos com toda paciência e dedicação.

Aos amigos, professores Dr. Edson Pamplona e Dr. José Arnaldo Barra Montevechi, pelo incentivo e apoio para enfrentar este desafio.

Aos amigos Fernando Batista Pinto, Luciano Lopes Pinto, que foram os incentivadores para que me ingressasse no curso de mestrado.

Ao colega, Prof. Demarcus Werdini, pela disposição do laboratório da FEPI para que realizasse parte dos meus experimentos.

Aos meus irmãos, meus maiores amigos, os quais posso sempre contar.

Aos familiares: tias, cunhadas, sobrinhos e primos, pelo apoio e carinho.

Gratidão eterna pela minha tia Querma, segunda mãe, madrinha, que sempre esteve do meu lado nos momentos mais importantes da minha vida.

À amiga Juliana Campos, pelo suporte e incentivo nas horas de incertezas.

Às fiéis amigas de infância, “ Conjuntinho de Amigas”, por estarem comigo para o que der e vier.

À Empresa de Fundação que cedeu o resíduo para a pesquisa.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O destino final dos resíduos industriais tem sido motivo de preocupação demandando a busca por soluções entre a sociedade em geral e a conscientização da população em relação ao meio ambiente. Neste contexto, as areias descartadas de fundição são consideradas os maiores problemas para as indústrias em questão. O crescimento da indústria e o conseqüente aumento na geração de resíduos têm impulsionado as pesquisas em procura de formas de reuso e reciclagem da Areia Descartada de Fundição (ADF). Existem algumas tecnologias para recuperação, regeneração e reutilização da ADF, uma delas é o reaproveitamento como agregado parcial em concreto. Dessa forma, reduz o grande descarte de resíduos e sua disposição em aterros de resíduos sólidos industriais e coopera para que a areia seja extraída em menor quantidade do meio ambiente. Com base na legislação Federal Brasileira, alguns estados já possuem normatizações para aplicação deste resíduo. Diversos estudos foram feitos com ADF tendo resultados satisfatórios, quanto a resistência e durabilidade, com a utilização parcial de ADF em artefatos de concreto, sub-base e base para pavimentação, blocos para alvenaria, pisos para pavimentos Intertravados entre outros. No entanto, são escassos os estudos da ADF retida no Sistema de Exaustão das indústrias de fundição, chamado de Pó de Exaustão. A primeira parte deste estudo possuiu como objetivo analisar e caracterizar o Pó de Exaustão, de uma indústria de autopeças em estudo de caso e também, os agregados, areia comum e brita, para confecção do concreto com substituição parcial do agregado miúdo (areia). Os ensaios das propriedades físicas como granulometria, massa específica e massa unitária foram realizados, segundo as normas ABNT, para obtenção do traço da mistura. As caracterizações químicas, através do extrato solubilizado e lixiviado, do resíduo foram avaliadas para identificar a presença de metais pesados. O resíduo foi classificado como não inerte e não perigoso, Classe II A, e com propriedades físicas adequadas para ser utilizados como substituto parcial do agregado miúdo na confecção de concreto. Na segunda parte, foi calculado o traço do concreto e foram confeccionadas seis diferentes proporções, 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, do resíduo em substituição parcial da areia para obtenção de concreto convencional, a fim de se obter resistência à compressão superior a 25 MPa. Por meio dos resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão, concluiu-se que o resíduo pode ser usado nas misturas de concreto com melhoras de resistência. Aos 28 dias, a mistura com 40% apresentou resistência mecânica à compressão de 46 MPa.

Palavras Chave: Areia de Fundição, Pó de Exaustão, Concreto convencional.

ABSTRACT

The final destination of industrial waste has been a matter of concern, which demands solutions from society in general as well as the awareness of the population in relation to the environment. In this context, waste foundry sand (WFS) is considered one of the biggest problems for the industries in question. The growing of the foundry industry and the consequent increase in waste, have encouraged researches to find ways to reuse the WFS. There are some technologies for the recovery, regeneration and reuse of WFS, one of which is the reuse as a partial aggregate in concrete. In this way, waste dumping and its disposal in industrial solid waste landfills is reduced and less sand is removed from the environment in large amounts. Based on the Brazilian federal legislation, some states already have rules to be applied on the use of this waste. Several studies have been carried out with WFS displaying satisfactory results concerning resistance and durability of concrete art crafts, sub foundation and foundation of road surfaces, bricks, pavement tiles and several other uses having WFS as a partial substitute. However, studies concerning exhaust dust retained in the exhaust system of foundry industries are scarce. The first part of the study case aimed to determine and analyze the exhaust dust of an automobile industry and also study the aggregates, sand and coarse in the production of concrete having small aggregate partially substituted. The test on the physical properties like size classification, specific gravity and density were carried out according to ABNT norms to obtain the mixture. The chemical characterization of the leachate solution of the waste was assessed to identify the presence of heavy metals. The waste was classified as non-inert and non-ferrous, class II A with adequate physical properties to be used as partial substitute to fine aggregate in the production of concrete. In the second part, the concrete mixture was calculated and six different proportions were used: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% of WFS as substitute to conventional sand to obtain the concrete so as to have compressive strength above 25 MPa. Through the compressive strength test results, it was concluded that the waste may be used in concrete mixtures and showed improvement in the resistance. On the 28th day, the 40% mixture presented a compressive strength of 46 MPa.

Keywords: Waste Foundry Sand, Exhaust Dust Conventional Concrete.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADF	Areias Descartadas de Fundição
AFS	American Foundry Society
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
ANEPAC	Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CC	Construção Civil
CEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNTL	Centro Nacional de Tecnologia Limpa
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CP	Cimento Portland
Cp	Corpo de Prova
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de raios X
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPA	Environmental Protection Agency
FEPI	Fundação de Ensino e Pesquisa de Itajubá
IAP	Instituto Ambiental Paranaense
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
LF	Lei Federal
LM	Limite Máximo
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RN	Recursos Naturais
RS	Resíduos Sólidos
SEMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VPU	Velocidade de Pulso Ultra-sônico
a/c	Relação água e cimento
Mpa	Megapascal

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição da produção de fundidos no Brasil	22
Figura 2 - Produção de fundidos no Brasil	22
Figura 3 - Fluxograma simplificado do processo de fundição	25
Figura 4 - Esquema de obtenção de peça fundida utilizando molde de areia	26
Figura 5 - Matérias-primas da areia verde	27
Figura 6 - Potencial de poluição de uma típica fundição de ferro com indicação da saída do pó de exaustão	31
Figura 7- Esquema comparativo entre os volumes dos componentes do concreto e seus valores	41
Figura 8 - Classificação da areia quanto à forma	44
Figura 9 - Classificação do cimento	45
Figura 10 - Fatores que influenciam na resistência do concreto	54
Figura 11 - Dependência entre a resistência do concreto e a relação a/c.....	55
Figura 12 - Sequência para o uso de ADF em Santa Catarina	62
Figura 13 - Pó de Exaustão de ADF objeto da pesquisa.....	65
Figura 14 - Sequência de peneiras para ensaio de granulometria para agregados miúdos.....	67
Figura 15 - Granulômetro a Laser	67
Figura 16 - Picnômetro para massa específica de agregados miúdos	68
Figura 17 - Balança para cálculo da massa unitária do resíduo.....	69
Figura 18 - Microscópio Eletrônico de Varredura	69
Figura 19 - Difratômetro de raios X	70
Figura 20 - Determinação da massa específica da areia a) Amostra da areia comum e b) Picnômetro para medida da massa específica da areia.....	72
Figura 21 - Sequência de peneiras para determinação da granulometria da brita	73
Figura 22 - Determinação da massa específica da brita com balança hidrostática ...	74
Figura 23 - Determinação da massa unitária solta da brita	75
Figura 24 - Vista geral do Laboratório de Estruturas da UNIFEI	77
Figura 25 - Determinação do abatimento de concreto com tronco de cone metálico	78
Figura 26 - a) Vibrador portátil e mangote, b) Corpos de prova moldados em moldes cilíndricos	78

Figura 27 - Corpos de prova: a) desmoldados, b) identificados e c) no interior do tanque de cura	79
Figura 28 - a) Molde metálico para capeamento e b) Cps capeados com enxofre ...	79
Figura 29 - Vista da máquina Time Testing Machines® WAW-1000 C	80
Figura 30 - a) Teste de compressão axial, b) rompimento axial.....	81
Figura 31 - a) Teste de compressão diametral, b) rompimento diametral	81
Figura 32 - Cps na a) estufa, e b) dessecador	82
Figura 33 - Cps a) em fervura, b) peso hidrostático e c) peso molhado	82
Figura 34 - Curva granulométrica do pó de Exaustão e da areia comum	85
Figura 35 - Curva granulométrica do Pó de Exaustão gerada no granulômetro a laser	86
Figura 36 - MEV por Elétron Secundário (SE) com aumento de 100x	89
Figura 37- MEV por Elétron retro espalhados (BSD) com aumento de 100x	89
Figura 38 - MEV por Elétron retro espalhados (BSD) com aumento de 200x	90
Figura 39 - MEV por Elétron retro espalhados (BSD) com aumento de 100x	90
Figura 40 - MEV por Elétron retro espalhados ambos com aumento de 54x; a) Pó de Exaustão e b) Areia Comum	91
Figura 41 - MEV EDS - Espectro obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados.	92
Figura 42 - Análise de fases por Difratoograma (DRX) do Pó de Exaustão	93
Figura 43 - Gráfico de tensões por compressão axial nas misturas de concreto	99
Figura 44 - Gráfico do Modulo de Elasticidade das misturas de concreto.....	100
Figura 45 - Gráfico de tensões por compressão diametral das misturas de concreto	101
Figura 46 - Gráfico de absorção em água e índice de vazios das misturas	102
Figura 47 - Massas Específicas das misturas de concreto	103
Figura 48 - MEV EDS do concreto controle - Aumento de 200x	103
Figura 49 - MEV EDS Espectro obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados no ponto 1.	104
Figura 50 - MEV EDS Espectro obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados no ponto 2	105
Figura 51 - MEV EDS concreto 50% - aumento de 184x	106
Figura 52 - MEV EDS Pontual do concreto 50% - aumento de 184x	107

Figura 53 - MEV EDS obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados no ponto 1.....	107
Figura 54 - MEV EDS - Espectro obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados no ponto 2.	108
Figura 55 - Curva de Abrams Cimento CP V ARI.....	129
Figura 56 - Amostra da mistura de concreto com 100% do Pó de Exaustão	136
Figura 57 - Abatimento da mistura com 100% do pó de Exaustão.....	136
Figura 58 - Amostra de Cps com 100% do Pó de Exaustão	137
Figura 59 – Cps com rompimento axial.....	137

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Ranking mundial na produção de fundidos	21
Tabela 2 - Classificação granulométrica para areia	42
Tabela 3 - Classificação da areia quanto ao tamanho dos grãos (mm)	42
Tabela 4 - Classificação da areia quanto ao módulo de finura (mm)	43
Tabela 5 - Dimensões do agregado graúdo	43
Tabela 6 - Traço das misturas de concreto e massas dos componentes.....	76
Tabela 7- Distribuição Granulométrica do Pó de Exaustão e Areia.....	84
Tabela 8 - Distribuição do tamanho da partícula do Pó de Exaustão.....	86
Tabela 9 - Distribuição granulométrica a laser	87
Tabela 10 - Concentração – Limite máximo no extrato lixiviado do Resíduo	94
Tabela 11 - Concentração – Limite máximo Solubilizado do Resíduo	95
Tabela 12 - Distribuição Granulométrica da Brita.....	97
Tabela 13 - Valores do abatimento das misturas	98
Tabela 14 - Características Massa Bruta do Concreto 50%.....	109
Tabela 15 - Características Químicas - Extrato Lixiviado do Concreto 50%	110
Tabela 16 - Características Químicas - Extrato Solubilizado do Concreto	111
Tabela 17- Volume de água por m ³ de concreto	130
Tabela 18 - Volume Aparente do Agregado Compacto Seco por m ³ de Concreto..	130
Tabela 19 - Resultados das Tensões de Compressão Axial e Módulo de Elasticidade das misturas	132
Tabela 20 - Resultados das Tensões por compressão diametral das misturas	133
Tabela 21 - Resultados obtidos da análise de absorção por imersão em água	135

Lista de Quadros

Quadro 1 - Exemplos de reutilização de resíduos de uma fundição	34
Quadro 2 - Principais compostos hidratados do cimento	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	19
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 A INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO.....	21
2.2 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO	23
2.2.1 Etapas do Processo de Fundição	24
2.2.2 Areias de Fundição	26
2.2.2.1 Areia Base	26
2.2.2.2 Areia a Verde.....	27
2.2.2.3 Areia ligada quimicamente	28
2.2.2.4 Areia descartada de fundição	28
2.2.2.5 Areia do Sistema de Exaustão (Pó de Exaustão).....	29
2.2.3 Características Físicas e Químicas da ADF e Pó de Exaustão	29
2.3 PRINCIPAIS IMPACTOS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO	30
2.4 TRATAMENTOS DA ADF	33
2.4.1 Recuperação	33
2.4.2 Regeneração	33
2.4.3 Reutilização	34
2.5 LEGISLAÇÃO FEDERAL AMBIENTAL	35
2.5.1 Normas e Regulamentações Referentes às Areias de Fundição	36
2.5.2 Leis Estaduais	37
2.5.3 Leis Municipais	39
2.6 GENERALIDADES SOBRE O CONCRETO	39
2.6.1 Vantagens e Desvantagens.....	40
2.7 CONCRETO E SEUS COMPONENTES	40
2.7.1 Classificação e aplicações do cimento	44
2.7.1.1 Hidratação do Cimento	46
2.7.2 Microestrutura.....	48
2.7.3 Traço ou Dosagem	48
2.7.4 Especificação do concreto	49
2.8 PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	50
2.8.1 Propriedades do concreto fresco	50
2.8.1.1 Fatores que afetam a trabalhabilidade	51
2.8.2 Propriedades do concreto endurecido	52
2.8.3 Resistência Mecânica do Concreto.....	53
2.8.3.1 Fatores que influenciam na Resistência Mecânica.....	54
2.9 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	56

2.10 ADF E AS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	58
2.11 ADF EM OUTRAS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL	62
3 MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1 ANÁLISE DO PÓ DE EXAUSTÃO	66
3.1.1 Granulometria	66
3.1.2 Determinação da Massa Específica.....	68
3.1.3 Determinação da massa unitária solta.....	68
3.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura	69
3.1.6 Difração de Raios X.....	70
3.1.4 Periculosidade	70
3.2 ANÁLISE DA AREIA COMUM	71
3.2.1 Granulometria	71
3.2.2 Massa Específica.....	71
3.2.3 Massa unitária e volume de vazios	72
3.3 ANÁLISE DA BRITA	72
3.3.1 Granulometria	73
3.3.2 Massa Específica.....	73
3.3.3 Massa unitária solta	74
3.4 ANÁLISE DO CONCRETO COM ADIÇÃO DO PÓ DE EXAUSTÃO	75
3.4.1 Dosagem do Concreto	76
3.4.2 Abatimento.....	77
3.4.3 Moldagem dos Cps	78
3.4.4 Desmoldagem, identificação e cura dos Cps.....	79
3.4.5 Resistência Mecânica	80
3.4.6 Absorção em água e Índice de vazios	81
3.4.7 MEV EDS.....	82
3.4.8 Periculosidade	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	84
4.1 ANÁLISES DOS AGREGADOS MIÚDOS.....	84
4.1.1 Granulometria do Pó de Exaustão e da Areia Comum	84
4.1.2 Massa Específica e Massa Unitária Solta	88
4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	88
4.1.4 MEV EDS do Pó de Exaustão	92
4.1.5 Difração de raios X (DRX) do Pó de Exaustão	93
4.1.6 Periculosidade do Pó de Exaustão	94
4.2 ANÁLISE DA BRITA	96
4.2.1 Granulometria	96
4.3.2 Massa Específica e Massa Unitária Solta	97
4.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM PÓ DE EXAUSTÃO.....	97
4.4.1 Concreto Fresco: Abatimento	98
4.4.2 Resistência à Compressão Axial	98
4.4.3 Módulo de Elasticidade Tangente.....	99

4.4.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral	101
4.4.5 Absorção de Água e Índice de Vazios	102
4.4.6 Massa Específica	102
4.4.7 MEV EDS do concreto controle (0%).....	103
4.4.8 MEV EDS do concreto com 50% do Pó de Exaustão	106
4.4.7 Periculosidade	109
5 CONCLUSÕES	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
APÊNDICE A - ANÁLISES FÍSICAS DOS AGREGADOS.....	124
APÊNDICE B- DOSAGEM DO CONCRETO – MÉTODO ABCP	129
APÊNDICE C – ANÁLISES DO CONCRETO ENDURECIDO.....	132
APÊNDICE D - Teste da mistura do concreto com 100% do Pó de Exaustão.....	136
ANEXO A – DADOS DO CIMENTO	138

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a extração dos Recursos Naturais vem sendo demonstrada desde o final do séc. XVIII em relação à mineração e devastação das florestas para uso agropecuário; porém, somente a partir do início do sec. XX é que surgiram os primeiros documentos a fim de regulamentar o acesso a estes recursos (SÁNCHEZ, 2008). O conceito de sustentabilidade começou a ser debatido na década de 60 e desde então, várias propostas foram feitas mostrando a necessidade de um padrão de desenvolvimento visando ao futuro do planeta com relação ao meio ambiente (CORRÊA, 2009). No entanto, a questão ambiental começou mesmo a tomar força e formar consciência na sociedade na década de 70, quando foi perceptível que alguns recursos estavam se tornando escassos e assim normas e leis começaram a ser formuladas em questão do uso racional das águas, florestas, fauna, flora, minérios entre outros. Mas, tais regulamentos e normas ainda não visavam aos danos causados ao meio ambiente (SÁNCHEZ, 2008). Um grande salto nas pesquisas em busca de soluções aos impactos ambientais causados pelo volume de resíduos gerados, tanto na área industrial quanto domiciliar, e a destinação, ou seja, o manejo adequado dado a estes, aconteceu na década de 90 (CHAVES; BATALHA, 2006). Com uma legislação mais rígida, houve desde então, uma tendência em gerenciar melhor o resíduo para a preservação do meio ou no mínimo, minimizar a degradação ambiental (LOPES, 2009).

Sendo assim, a Política Nacional do Meio Ambiente, PNMA, Lei Federal nº 6938 de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981), passou a exigir a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e licenciamento ambiental para toda e qualquer empresa que utiliza os Recursos Naturais (RN) e/ou que pode causar danos ao meio. Desta forma, a Lei nº 12.305/10, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta Lei dispõe sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis, Art. 1º Lei nº 12305/10. Institui a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos desde os fabricantes, passando pelos importadores, consumidores até o descarte, Art. 3º Lei nº 12305/10. Contém subsídios importantes para auxiliar o gerenciamento dos Resíduos Sólidos

(RS), objetivando minimizar os problemas ambientais, sociais e econômicos, partindo da proposta de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada, Art. 9º Lei nº 12305/10. Ressalte-se que a PNRS foi regulamentada pelo Decreto nº 7404 (BRASIL, 2010a).

Dentro das medidas de gerenciamento de resíduos sólidos industriais encontram-se programas de Produção mais Limpa (P+L) que se baseiam nos princípios de “antecipar e prevenir” possíveis fontes geradoras de problemas ambientais. Estes programas propõem estratégias preventiva, econômica, ambiental e tecnológica integrada aos processos e produtos objetivando melhorar a eficiência no uso de matérias-primas, água e energia, partindo da não geração, redução e reciclagem de resíduos gerados (CNTL, 2003).

Um exemplo é a Areia Descartada de Fundição (ADF) gerada na desmoldagem de peças metálicas, em grande quantidade, tornando um grande problema para a indústria de fundição. A fundição é o método mais rápido e aplicado para obter peças de metais; e a grande maioria das fundições no Brasil, cerca de 80%, utiliza areia na elaboração de seus moldes (SENAI, 1987); este processo é largamente empregado por ser um método simples e de baixo custo (CASOTTI; DEL BEL FILHO; CASTRO, 2010). Classificada como resíduo classe II A, ou seja, “não-perigoso e não inerte”, conforme Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004a), atualmente, ADF é em grande parte, depositada em aterros industriais, representando um passivo ambiental para as futuras gerações. A areia descartada de fundição (ADF) é um dos resíduos industriais de maior volume. No Brasil alcança em média, 250 mil toneladas mensais ou 3 milhões de toneladas ao ano (ABIFA, 2012). Em 2005 o estado de São Paulo descartava um milhão de toneladas por ano (ARMANGE, 2005). Segundo Bonet (2002), os maiores problemas das empresas de fundição são resíduos sólidos constituídos pelos excedentes das areias usadas na confecção dos moldes e a disposição dos resíduos de areias de fundição em aterros industriais. Além do alto custo, deve ser monitorado para que não acarretem problemas ambientais mais sérios. Os princípios de Produção mais Limpa se aplicam às fundições com pequenas adaptações ao tipo de processo e/ou produto (FAGUNDES; VAZ; OLIVEIRA, 2009).

Por outro lado, a indústria da Construção Civil é uma grande extrativista de recursos naturais, sendo os agregados os materiais mais utilizados (LA SEMA, 2009). Segundo a IBRACON, o concreto é o material construtivo mais utilizado no mundo, consumindo 11 bilhões ao ano, ou seja, em média 1,9 toneladas por habitante por ano (PEDROSO, 2009). Calcula-se que, no Brasil, as concreteiras tenham produzido 51 milhões de m³ no ano de 2012 (ABCP, 2013). Estima-se que o consumo anual de agregados para concretos e argamassa tenha sido de 210 milhões de toneladas (JOHN, 2000). O consumo de agregados naturais varia entre um a oito t/hab. ano, visto que no Brasil em 2013, o consumo de areia para construção civil foi de 377.248.000 t (KULAIF, 2014).

A sustentabilidade na construção civil envolve economia na matéria prima, redução de desperdícios, o reaproveitamento dos resíduos e desenvolvimento de novos materiais utilizando resíduos, como subprodutos; são medidas de gerenciamento proporcionando economia de recursos naturais e minimização dos impactos ambientais (SPOSTO, 2006; JOHN, 1999).

O aumento das restrições ambientais e o conseqüente aumento de custos para as indústrias quanto ao descarte correto do resíduo tem impulsionado as pesquisas para melhor aproveitamento de ADF (FAGUNDES; VAZ; OLIVEIRA, 2011).

Para a Comissão do Meio Ambiente da ABIFA, o maior desafio da indústria de fundição é desmistificar junto à sociedade a utilização ambientalmente correta das ADF. A comissão atua em conjunto com as indústrias para o desenvolvimento de normas para a reutilização do resíduo (ABIFA, 2010).

Nesse sentido, procura-se aliar a minimização de extração de recursos naturais, como a areia para concreto na indústria da construção civil, com a redução das quantidades de resíduos encaminhados para aterros industriais. Face a crescente produção de ADF em conseqüência do acréscimo na produção de fundidos, e a partir de estudos prévios sobre o uso de ADF em concreto, busca-se neste estudo, avaliar o comportamento da ADF retirada do Sistema de Exaustão. O resíduo também chamado de Pó de Exaustão, foi usado como substituto parcial do agregado miúdo em concreto, em estudo de caso do Pó de Exaustão de ADF advindo de uma indústria de autopeças localizada no Sul de Minas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido ao grande volume de ADF gerado pelas indústrias de fundição e a necessidade de aterros industriais apropriados para a disposição ser um problema ambiental, a viabilidade de aplicação deste resíduo em outros setores é uma prática de sustentabilidade, objetivando a redução de custos com transporte, áreas para disposição e os prejuízos ao meio ambiente. Justifica-se este estudo sobre o uso do Pó de Exaustão de ADF em substituição parcial de agregados para concreto pois os resultados desta pesquisa deverão auxiliar os órgãos ambientais no incentivo ao reuso do resíduo em concreto para diversas aplicações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho do concreto com substituição parcial de agregados finos por Pó de Exaustão.

1.2.2 Objetivos Específicos

Constituem-se em objetivos específicos do presente estudo:

- Avaliar as características físicas, químicas e morfológicas do resíduo advindo da indústria sul-mineira de autopeças;
- Avaliar as propriedades de concreto com Pó de exaustão no estado fresco.
- Analisar as propriedades mecânicas do concreto com substituição parcial de agregado fino por Pó de exaustão, no estado endurecido.
- Avaliar a possibilidade de encapsular o resíduo no concreto

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de aumentar a utilização de subprodutos industriais não perigosos, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (United States of America Environmental Protection Agency, USEPA) realizou um estudo sobre as características da areia de fundição, em 2007, e autorizou o uso desta em outros processos. Após avaliar as areias de fundição de aço, ferro e alumínio de mais de 30 indústrias com diferentes níveis de metais e constituintes orgânicos em mistura de solo, concluiu-se que não representam ameaça para a saúde humana e para o ambiente (USEPA, 2007).

Em sua pesquisa, Adegas (2007) relatou que a *American Foundry Society* (AFS) indicou o uso da ADF em aplicações geotécnicas, drenagem, cobertura de fossos e cobertura final de aterros. Para tais deve-se fazer um estudo da composição das areias visando aos critérios ambientais. Além disso, o autor cita estudos realizados nos Estados Unidos quanto ao uso das areias verdes de fundição para remoção de contaminantes ou redução da toxicidade na contaminação de águas subterrâneas com tricloroetileno (TCE). O autor (*op. cit.*) mencionou que a maioria das indústrias de fundição ferrosa não possuía gerenciamento efetivo do resíduo e que o reuso das areias geradas deveria ser incentivado pelos órgãos ambientais.

Experimentos para avaliar o uso de areia de fundição de ferrosos e não ferrosos em solos mostraram que estas não aumentam o risco de contaminar os solos e águas. (HINDMAN *et al.*, 2008). Mastella *et al* (2014) analisaram o comportamento mecânico e toxicológico de artefatos de concreto. A toxicidade foi avaliada em misturas com 25%, 50%, 75% e 100% de ADF e em relação ao comportamento mecânico foram realizadas misturas com 0%, 25% e 50% de ADF, com 3 concentrações diferentes de cimento. Os autores concluíram que o uso do resíduo é viável sob o ponto de vista mecânico e toxicológico.

A possibilidade da adição de ADF em concreto reduzindo os impactos ambientais e o volume de descarte em aterros é viável conforme Armange (2005); Silva, C.; Silidônio Júnior; Silva R. (2011).

De acordo com Benson e Bradshaw (2011), as ADF são de melhor qualidade que as areias normalmente usadas em construção civil, pois as areias utilizadas para caixa de moldagem são extraídas de rochas de sílica, enquanto as areias usadas em construção civil normalmente são dragadas do fundo de rios, contendo mais impurezas. Ainda assim, nos EUA apenas 28% das areias descartadas são reutilizadas em construção e o resto despejadas em aterros. A reciclagem do resíduo ADF pode economizar energia, reduzir a necessidade de matéria prima nova, diminuir custos para os produtores e conseqüentemente, para os consumidores.

2.1 A Indústria de Fundição no Brasil e no Mundo

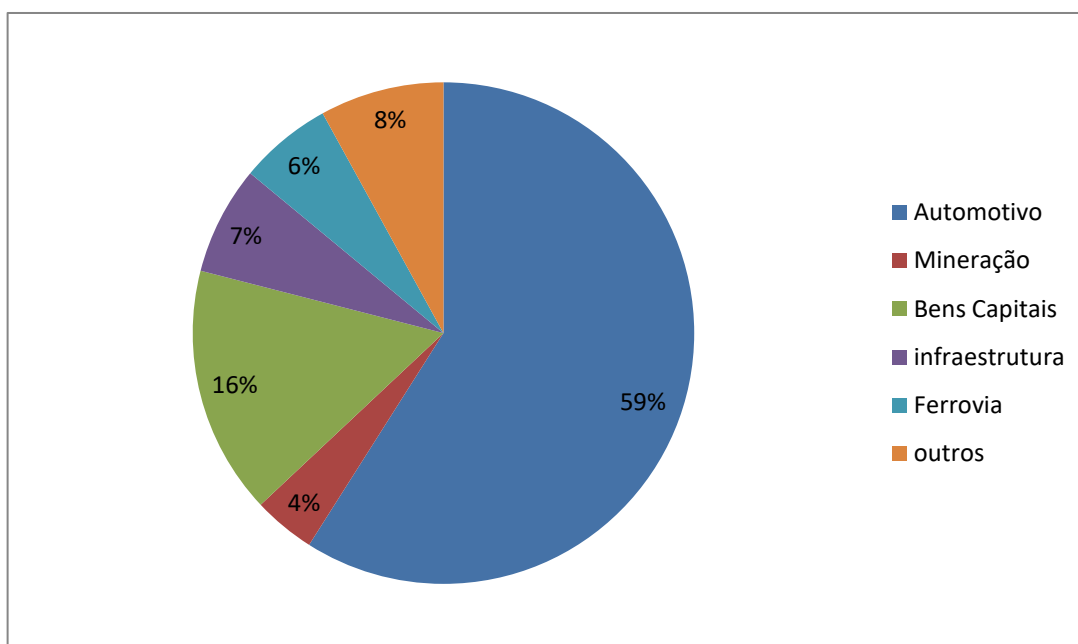
O Brasil ocupa a 7ª posição (Tabela 1) no *ranking* mundial de materiais fundidos, com uma produção anual de três milhões de toneladas e 2º lugar no *ranking* na produção de Minério de Ferros, com faturamento de 8,4 bilhões de dólares em 2014. Possui cerca de 1300 empresas de fundição, sendo que 34% estão concentradas no estado de São Paulo, 25% em Minas Gerais e 26% em Santa Catarina e o setor emprega mais de 65 mil trabalhadores (ano base 2014). A maioria da produção se destina à indústria automotiva, ou seja, 58%, dos produtos como indicados na Figura 1 (ABIFA, 2015a).

Tabela 1 - Ranking mundial na produção de fundidos

País	Toneladas
1º China	44.500,000
2º USA	12.250,000
3º Índia	9.810,000
4º Japão	5.538,000
5º Alemanha	5.186,700
6º Rússia	4.100,000
7º Brasil	3.071,400
8º Coreia	2.562,000
9º Itália	1.971,000
10º França	1.748,200

Fonte: adaptada de ABIFA, 2015a.

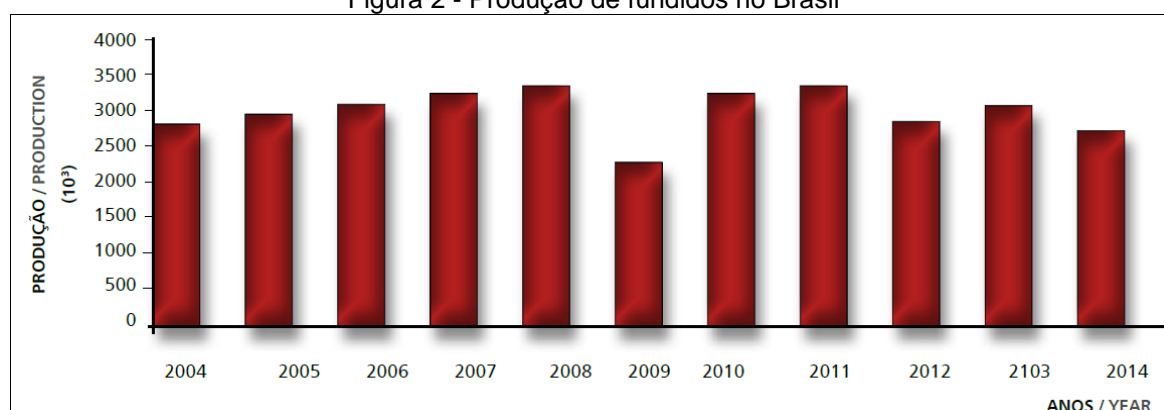
Figura 1 - Distribuição da produção de fundidos no Brasil



Fonte: elaborada com base em ABIFA, 2015a

A produção do setor apresentou crescimento contínuo, tendo uma pequena queda em 2009 devido a uma crise econômica internacional e nova redução em 2014, em função de uma crise financeira interna no Brasil. A Figura 2 representa a evolução da produção de fundidos no Brasil, do período de 2004 a 2014.

Figura 2 - Produção de fundidos no Brasil



Fonte: ABIFA, 2015^a

A produção global de fundidos é de 90 milhões de toneladas. Desde 2007, a China ocupa o 1º lugar no *ranking*, sendo utilizados principalmente, para infraestrutura, siderurgia e indústria automotiva. Um dos fatores que levam a China a

ocupar esta posição é a reduzida carga tributária, na qual os encargos trabalhistas são de 12% contra 65% no Brasil. Os EUA ocupam a 2ª posição na produção, porém, são os maiores importadores do mundo (CASOTTI; DEL BEL FILHO; CASTRO, 2010).

Nos EUA, nove milhões de resíduos de fundição eram depositados em aterros industriais que custavam U\$15-75 por tonelada. Esta despesa incentivou estudos autorizando o uso alternativo deste em taludes, base para construção, mistura asfáltica, argamassas, vitrificação de materiais perigosos, mistura de solos para agricultura, fabricação de lã de rocha, fibra de vidro, infraestrutura. (SIDDIQUE; SINGH, 2011).

2.2 O Processo de fundição

Com o objetivo de fabricar peças metálicas, o processo de fundição é o método mais utilizado no mundo. Este consiste na fusão do metal, em seguida é colocado nos moldes, que se solidifica nas formas conforme as características dos moldes (CAMPOS FILHO, 1978; CARNIN *et al*, 2010).

Existem vários processos de fundição. O que diferencia um processo de outro é a maneira como o metal líquido é vazado, por gravidade ou injeção, o tipo de moldagem, em caixa de areia ou moldes metálicos.

O processo é determinado principalmente pelo tipo do produto final que se deseja obter. Depende do peso da peça, do formato, acabamento de superfície, tolerância dimensional e tipo de metal a ser fundido.

Peças de maior precisão dimensional como, para motores de avião, equipamentos aeroespaciais, equipamentos médicos e odontológicos e turbinas a gás, utilizam moldes em cera perdida.

Moldes permanentes, ou moldes metálicos, são feitos em aço ou ferro fundido. São usados para metais com temperatura de fusão mais baixas que o aço e o ferro fundido (ligas de chumbo, zinco. Alumínio, magnésio e certos bronzes). Utilizados

para fabricar bases de máquinas, blocos de cilindros de compressão, cabeçotes, bielas, pistões e coletores de admissão.

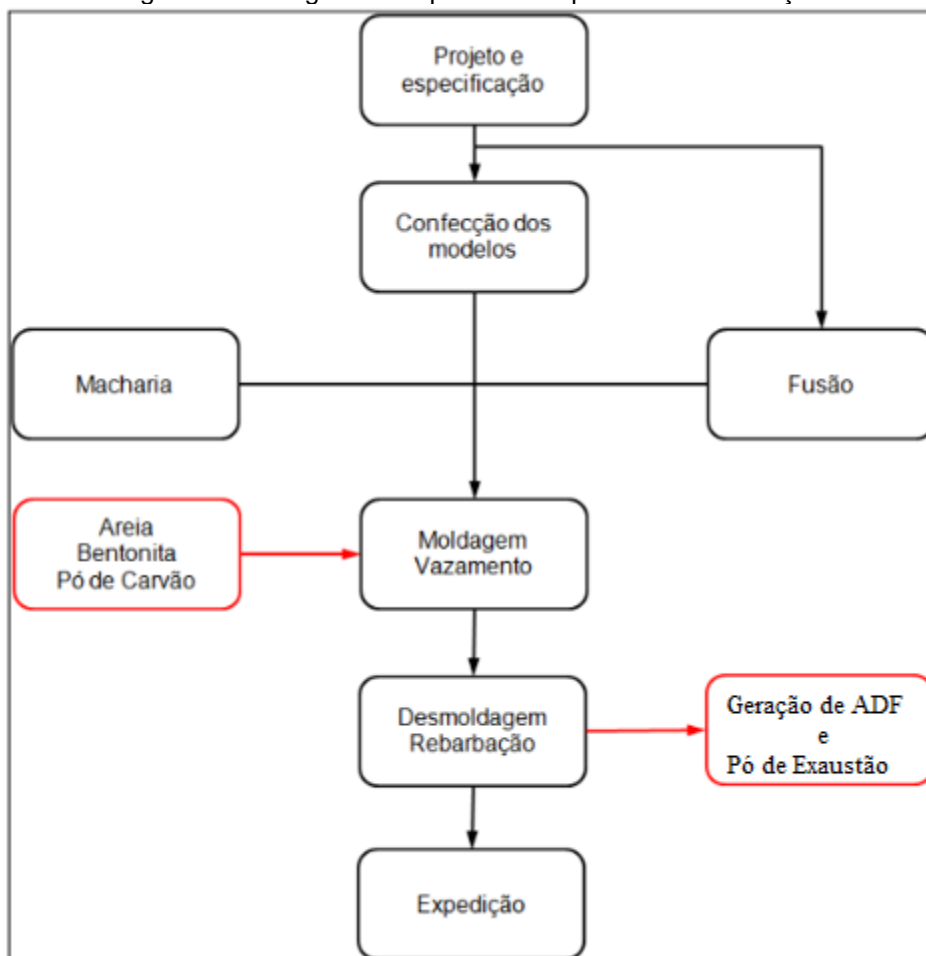
A fundição em areia é mais simples e a mais usada. A areia de moldagem é preparada adicionando à areia base, argila e aditivos para garantir a resistência mecânica aos moldes (LOPES, 2009). É utilizada na produção de peças de aço e ferro fundido, porque os moldes de areia são os que suportam melhor as altas temperaturas de fusão desses dois metais, mas também para a produção de peças de ligas de alumínio, latão, bronze e magnésio (BORGES, 2002).

2.2.1 Etapas do Processo de Fundição

Basicamente, as etapas de um processo de fundição são feitas conforme descrito (ALVES, 2012) e exemplificado na Figura 3:

- Fabricação do modelo da peça: formato da peça final.
- Confeção do molde: cavidade formato da peça final.
- Confeção dos machos: peças de areia que delimitam as partes internas da peça.
- Fusão: metal é fundido no forno.
- Vazamento: o metal líquido é despejado nos moldes.
- Desmoldagem: após o resfriamento da peça o molde é quebrado por vibração.
- Rebarbação e limpeza: remoção do metal excedente na superfície da peça.

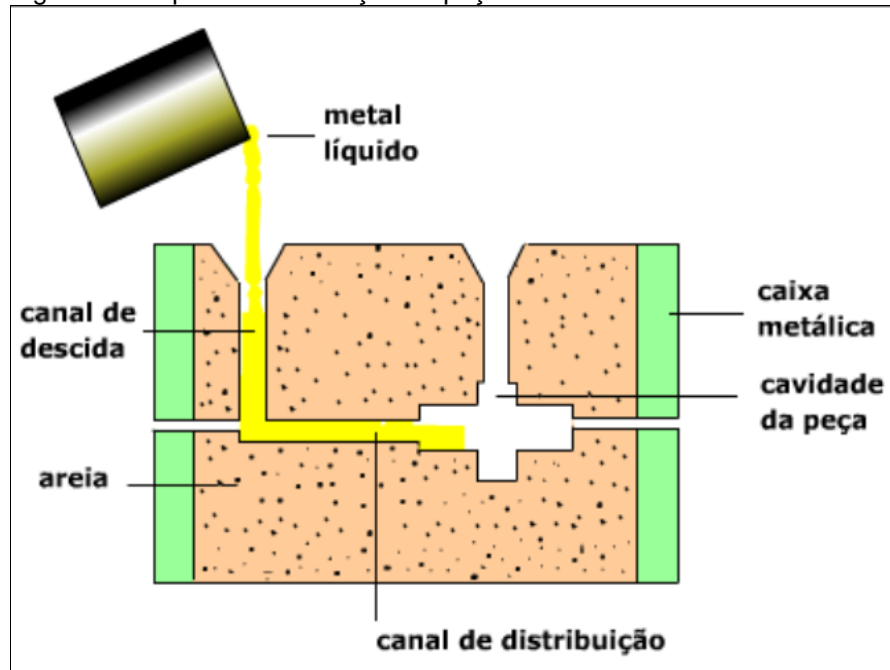
Figura 3 - Fluxograma simplificado do processo de fundição



Fonte: PAVESI e PFITSHER (2014) adaptado pelo autor

Os moldes em areia são confeccionados dando forma da peça na areia compactada, em duas metades, que depois são unidas, podendo conter furos ou não. Os machos, formados por areia ligada quimicamente, dão o formato interno das peças. O metal fundido é vazado preenchendo os vazios do molde e quando se solidifica reproduz a sua geometria (Figura 4). A peça é retirada quebrando-se os moldes sendo encaminhada para usinagem, acabamento e tratamento térmico, conforme propriedades desejadas (LOPES, 2009; FAGUNDES; VAZ; OLIVEIRA, 2011). O consumo de areia depende do tipo da peça, varia de 0,8 a 1(uma) tonelada para cada tonelada de fundidos e cerca de 90% pode ser reinserida no processo (COSTA *et al.*, 2010).

Figura 4 - Esquema de obtenção de peça fundida utilizando molde de areia



Fonte: Centro de Informação Metal Mecânica (2014)

2.2.2 Areias de Fundição

2.2.2.1 Areia Base

A areia base é a areia ao natural e constitui o componente de maior porcentagem nas areias de fundição. De origem mineral, devido à fragmentação de rochas, sua composição química varia de acordo com a rocha e tipo de solo, possui grãos angulares de variados tamanhos entre 0,063 a 2,0mm, pode ser de sílica, cromita ou zirconita. A areia base mais utilizada é sílica (SiO_2) (SENAI, 1987; FAGUNDES, 2010). Quanto maior é a porcentagem de sílica, maior a refratariedade da areia, sendo que, esta característica depende do metal a ser fundido (WATANABE, 2004).

2.2.2.2 Areia a Verde

A areia a verde é composta de areia base, geralmente de sílica de alta qualidade e baixo custo (85% - 95%), aglomerante como argila de bentonita (4% - 10%), aditivo carbonáceo (2% - 10%) de acordo com a Figura 5, para melhorar o acabamento da superfície e água (2%- 5%) (SINGH; SIDDIQUE, 2012; SIDDIQUE; SCHUTTER; NOUMOWE, 2009). Utilizada em 70% dos moldes, essa mistura garante características de trabalhabilidade, maleabilidade, compatibilidade, coesão, resistência à compressão e tração, permeabilidade e desmoldagem (ARMANGE, 2005). Por ser um processo de moldagem econômico e rápido, a areia verde é a mais usada (ABIFA, 1999). De acordo com Baumer (2004), quanto maior o módulo de finura da areia verde, o molde terá menor permeabilidade, com espaço entre grãos menores dificultando a penetração do metal, proporcionando melhor acabamento das peças. Recebe este nome devido a presença de água na mistura que fornece a resistência a verde (SIDDIQUE *et al*, 2010).

Figura 5 - Matérias-primas da areia verde



Fonte: Pereira *et al.*, 2005

➤ Componentes da Areia a Verde e suas Propriedades

Os componentes da mistura de Areia a Verde são descritos conforme Adegas (2007).

- Argila de Bentonita: mineral constituído principalmente, por silicato de alumínio e é o principal aglomerante da mistura. Mantêm a coesividade dos grãos quando em contato com a água e a estabilidade térmica.

- **Pó de Carvão:** evita a sinterização da areia com metal, formando um filme de grafite e melhorando o acabamento da peça fundida; cria uma atmosfera inerte na cavidade do molde, reduzindo a oxidação do metal e aumenta a plasticidade da areia.

No Brasil a bentonita natural é encontrada na forma cálcica, conhecida como bentonita cálcica natural que é ativada quimicamente com carbonato de sódio por processo industrial. A bentonita passa de cálcica para sódica conhecida como bentonita sódica ativada. Com melhores propriedades mecânicas para fundição.

2.2.2.3 Areia ligada quimicamente

A areia ligada quimicamente é usada na fabricação de machos, moldes que dão formato dos furos das peças, ou uma peça em areia que delimita as partes internas. É composta de areia de sílica (97%-99%), aglomerante, água e ligante químico (1% - 3%), sendo o mais usado o óxido-fenólico (SINGH; SIDDIQUE, 2012). Normalmente, tem cor clara e textura mais grossa que a areia verde. A água age como solvente ou catalizador para ativar os ligantes orgânicos. Após a fusão e resfriamento da peça a resina se desintegra e a areia pode ser removida da cavidade da peça (ALVES, 2012). Esta não é utilizada no processo da indústria em estudo de caso.

2.2.2.4 Areia descartada de fundição

A Areia descartada de fundição é a areia resultante da desmoldagem das peças. Possui composição mineralógica variável, com agente ligante (orgânico ou inorgânico) e aditivos, dependendo do processo. Esta areia pode ser reutilizada várias vezes, porém contém resíduos de metais do processo de moldagem. O acúmulo desse material, resinas e aditivos a tornam indesejável, pois pode causar problemas na qualidade dos moldes, sendo assim, descartadas (ABIFA, 1999; PENKAITIS, 2012). As ADF, constituídas de Areia Verde e/ou Areia ligada quimicamente, compõem 90% dos resíduos gerados por uma indústria de fundição (MORAES, 2002).

2.2.2.5 Areia do Sistema de Exaustão (Pó de Exaustão)

O Pó de Exaustão é gerado a partir da mistura de areia, bentonita e carvão vegetal na fabricação dos moldes de areia verde para a fundição de peças metálicas. Durante a desmoldagem das peças em esteira vibratória, o sistema de exaustão é utilizado a fim de evitar partículas suspensas no ambiente. Possui baixa granulometria e não é regenerada, pois prejudica as propriedades dos moldes por serem pouco permeáveis, dificultando a saída dos gases, formando bolhas nas peças fundidas (RIBEIRO, 2008). O resíduo é separado do sistema através de captação por filtros manga (PEREIRA, 2014).

2.2.3 Características Físicas e Químicas da ADF e Pó de Exaustão

As características físicas e químicas da areia de fundição dependerão do tipo de processo aplicado e a classificação depende do tipo de ligante utilizado. As mais usadas são areia verde e areia ligada quimicamente (SIDDIQUE; SINGH, 2011).

As ADF oriundas de areia verde são constituídas principalmente, de areia de sílica, aditivo carbonáceo para evitar a fusão da areia com metal, argila para aumentar a coesão das partículas, metais dependendo do processo, normalmente Fe, Cr e Al (PABLOS, 2008).

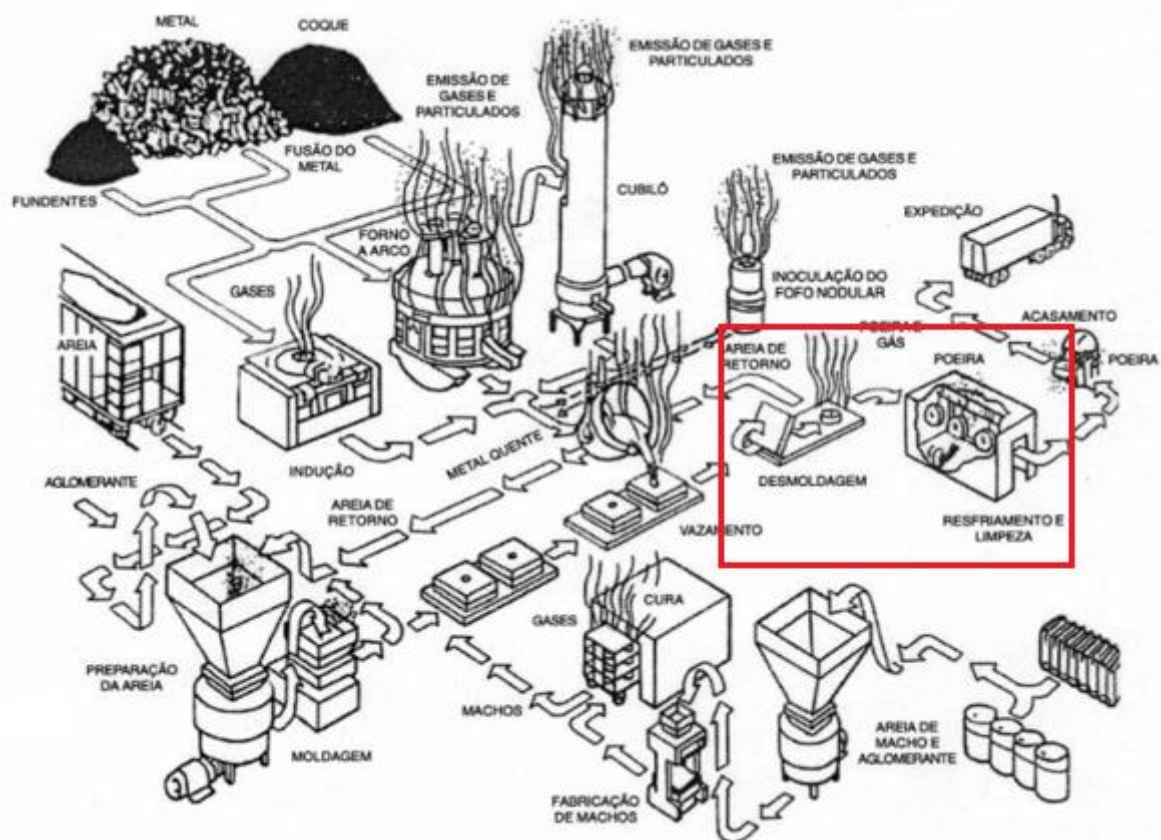
ADF apresenta variação de pH de 4 a 12 (JOHNSON, 1981), Guney *et al* (2010) encontrou pH igual a 9,1, possui granulometria uniforme, ou seja, 85% a 95% do material varia entre 0,6 mm e 0,15 mm, 5% a 20% menor que 0,075 mm (MONOSI *et al.*, 2010). A forma da partícula é tipicamente sub-angular ao arredondado. A Massa Específica varia entre 2,20 e 2,79 g/cm³ (MONOSI; SANI; TITTARELLI, 2010; JAVED e LOVELL, 1994), a Taxa de Absorção de 0,38% a 4,15%, dependendo da mineralogia da areia base, formas de grãos e conteúdos finos, sendo que as partículas mais finas, têm maior área de superfície específica o que aumenta a absorção de água. Em geral, as ADF têm baixo teor de umidade, inferior a 2% e baixa absorção (BENSON; BRADSHAW, 2011).

O Pó de exaustão foi caracterizado por Santos (2011) e Santos; Dalla Valentina, e Souza (2015) que concluíram que o resíduo possui baixa granulometria, em maior porcentagem abaixo de 0,080 mm. Por meio da análise de microestrutura realizada pela Microscopia Eletrônica de varredura (MEV), os autores (*op. cit.*) observaram que o resíduo tem forma lamelar irregular e de forma geral, os grãos possuem tamanho menores que 180 μm . A composição mineralógica foi analisada por difração de Raios- X e verificou-se a presença predominante de Oxido de Sílica (SiO_2), além de oxido de alumínio (Al_2O_3) e oxido de ferro (Fe_2O_3).

2.3 Principais Impactos do Processo de Fundição

A indústria de fundição é considerada grande causadora de impactos ambientais, tanto pela demanda na extração de minérios quanto nas diversas fases do processo (Figura 6), pelo descarte de resíduos sólidos, efluentes e emissões atmosféricas (PENKAITIS, 2012), sendo que a geração de resíduos sólidos, destacada na figura 6, é a mais relevante. No Brasil, apenas 22% dos resíduos de fundição possuem destinação correta para descarte considerando a reutilização uma alternativa economicamente viável (FENGLER, 2015). Em pesquisa realizada por Fagundes (2010), o custo do descarte é apontado como a maior dificuldade enfrentada pelas empresas, seguida da falta de outras aplicações para os resíduos de areia, ADF, em outros processos fora da fundição.

Figura 6 - Potencial de poluição de uma típica fundição de ferro com indicação da saída do pó de exaustão



Fonte: Carnin, 2008 Adaptado pelo autor

➤ Emissões Gasosas

As emissões gasosas são provenientes dos processos de desoxidação ao banho metálico, vazamento e recuperação térmica da areia (LOPES, 2009). Constituem-se em impactos ambientais os descritos a seguir, embora não sejam escopo do presente estudo.

➤ Escória

A escória provém do processo da transformação do minério de ferro em aço na fase de redução do ferro no qual são adicionados fundentes (cal), carvão (combustível) em temperaturas elevadas. Neste processo, as impurezas são separadas do metal fundido. É utilizada na fabricação de cimentos, fertilizantes e como lastro para estrada de ferro. Seu volume é pequeno comparado a areia e também não será avaliada neste estudo (LOPES, 2009).

➤ Areia Descartada de Fundição

As quantidades de ADF são consideradas maior volume se comparada aos outros resíduos, despertando singular atenção, por superar a somatória dos demais (ABIFA, 2008). De acordo com Siddique *et al.* (2015), as areias compõem 75-80% do total dos resíduos da indústria de fundição. Tendo em vista o grande volume de descarte desse resíduo, há uma preocupação por parte das indústrias quanto à disposição, pois devido a criação de regulamentos ambientais mais restritos, as fundições são obrigadas a destinarem seus excedentes de areia ligadas com resinas fenólicas para aterros industriais licenciados. A disposição inadequada destes pode contaminar o solo, águas superficiais e subterrâneas. No entanto, o custo e áreas disponíveis para esse fim também são problemas a serem resolvidos (PENKAITS, 2012).

Existem algumas orientações para que o problema seja minimizado, conforme a Comissão do Meio Ambiente da ABIFA (ABIFA, 1999):

- 1- Reduzir o descarte.
- 2- Desenvolver processos de regeneração das areias para que sejam reinseridas no processo.
- 3- Reaproveitamento do resíduo em outros fins.
- 4- Utilizar ligantes menos poluentes.
- 5- Avaliar o efetivo impacto ambiental das ADF.

Quanto aos ligantes, existem estudos sobre produtos menos agressivos a base de resinas sintéticas, geopolímeros e fosfatos ou sais baseados em biopolímeros para areias de moldagens (ABIFA, 2013).

A Indústria, em estudo de caso, utiliza o processo de regeneração das areias de desmoldagem que são reinseridas no processo e descartam as retidas no sistema de exaustão por não possuírem características físicas (muito finas) adequadas para os moldes.

2.4 Tratamentos da ADF

Os processos de tratamentos da ADF podem ser classificados em internos (recuperação e regeneração) e externos (reutilização). A recuperação é o mais utilizado como parte do processo produtivo, trazendo benefícios econômicos e ambientais. A regeneração decorre maior investimento e, portanto, mais inviável economicamente apesar do ganho ambiental. A reutilização em outros processos é o que concentra maior atenção na área de pesquisa (FAGUNDES *et al.*, 2010).

2.4.1 Recuperação

O processo de recuperação consiste basicamente em retirar os resíduos de materiais metálicos, descartar parte da areia que, em contato direto com metal fundido, tem suas características alteradas e outra parte é reutilizada no processo sendo acrescentada parte de areia nova (ADEGAS, 2007; FAGUNDES, VAZ; OLIVEIRA, 2009; FAGUNDES *et al.*, 2010; PENKAITS, 2012).

2.4.2 Regeneração

As areias de desmoldagem são submetidas a tratamentos de ação mecânica e/ou temperatura (calcinação), a fim de recuperar grande parte das características aproximando de areia nova e são reinseridas no processo. É feita a desagregação dos torrões, a remoção dos resíduos metálicos, retirada de restos de resinas, carvões e aditivos, por regeneração térmica, na qual a remoção da matéria orgânica é realizada em altas temperaturas (700°C a 800°C) (FAGUNDES; VAZ; OLIVEIRA, 2009; FAGUNDES *et al.*, 2010; PENKAITS, 2012). No entanto, não podem ser usadas muitas vezes, por perda definitiva das características e podem afetar a qualidade do molde (PENKAITS, 2012).

2.4.3 Reutilização

Processo de utilização das areias descartadas em outras aplicações como agregados para concreto, sub-base para pavimentos, fabricação de tijolos cerâmicos entre outros (FAGUNDES; VAZ; OLIVEIRA, 2009; FAGUNDES *et al.*, 2010) como mostra o Quadro 1. Conforme Pinto (2013), vários estudos sobre a reutilização deste resíduo têm demonstrado eficácia, colaborando com redução do volume lançado em aterros, minimizando o problema para a indústria da fundição.

Quadro 1 - Exemplos de reutilização de resíduos de uma fundição

<u>Resíduo</u>	<u>Reciclagem / Aplicação</u>
Areia Usada Verde ou quimicamente (90% da geração de resíduos numa fundição)	Recuperação/ regeneração
	Blocos/ tijolos
	Concreto
	Asfalto (massa asfáltica)
	Sub-base de asfalto
	Sílica para produção de clínquer - cimento Portland
	Sílica para produção de lã de rocha/vidro
	Agricultura - corretivo de solo
	Cobertura de aterro
	Cobertura de canais de corrida de altos fornos
Barreiras hidráulicas	
Escória	Cerâmica (porcelana)
Cavaco	Briquete (sucata para fusão)

Fonte: Moraes, 2002

A reutilização da areia como agregado para a construção civil colabora para a construção sustentável reduzindo a emissão de carbono. Segundo a USEPA (2015), a reciclagem diminui o nível de emissões de CO₂ em 20.000 ton. e gera economia de 20 milhões de BTU de energia. A USEPA, em conjunto com órgãos ambientais e indústrias, objetivou desenvolver recursos para aumentar a reciclagem ADF a 50% em 2015.

A USEPA (2015) estimou os benefícios ambientais da reutilização das areias descartadas de fundição à base de sílica, durante um ano:

- A economia de energia equivalente ao consumo anual de electricidade de 800 casas.
- Reduções de emissões de CO₂ equivalentes à remoção de 840 carros das estradas.
- Economia de 7,8 milhões de litros de água.

2.5 Legislação Federal Ambiental

As indústrias de fundição devem atender as leis federais vigentes em atendimento das responsabilidades ambientais.

A Lei Federal nº 6.938/81 (regulamentada pelo decreto 99.274/90), que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981; 1990) serviu como base para a exigência do EIA/RIMA (instrumentos para avaliação do impacto ambiental). Tal exigência, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (Resolução nº 1/1986), como parte integrante do processo de licenciamento ambiental para determinadas atividades (BRASIL, 1986).

A Lei Federal nº 9.605/98, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, (BRASIL, 1998), conhecida como Lei de Crimes Ambientais, por meio da qual pode responsabilizar administrativa, civil e penalmente pessoas físicas ou jurídicas, autoras ou coautoras de prejuízos causados à qualidade do meio ambiente.

A Lei Federal nº 12305/2010, já citada anteriormente, institui a PNRS que dispõe sobre a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, no Art. 14 define os planos nacional, estaduais, microrregionais e municipais de gestão integrada de resíduos sólidos (BRASIL, 2010a).

2.5.1 Normas e Regulamentações Referentes às Areias de Fundição

Os resíduos sólidos são definidos pela – Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2004a), como sendo os resíduos que se encontram no estado sólido ou semissólido, resultantes de atividades de cunho industrial, doméstico, hospitalar, comercial e agrícola, bem como, de serviços e de varrição.

A classificação de resíduos é feita pela identificação do processo de origem e de seus constituintes e a comparação com uma listagem de resíduos e substâncias as quais os impactos a saúde e ao meio são conhecidos. São denominados perigosos, Classe I ou Não perigosos, classe II.

São perigosos quando suas características proporcionam riscos à saúde dos seres humanos ou acarretam riscos ao meio ambiente quando gerenciados de forma imprópria. Esta análise é feita pelo ensaio de lixiviação que é o processo para determinação de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo por meio de dissolução em água destilada, ácido clorídrico, ácido nítrico, hidróxido de sódio e ácido acético glacial.

Dentre os resíduos não perigosos classificam os não inertes, IIA e os inertes, II B, que são avaliados pelo ensaio de solubilização, que permite prever a reatividade dos compostos. São realizados em água, solução de hidróxido de sódio, bicarbonato de sódio, ácido clorídrico, éter e ácido sulfúrico concentrado.

No Brasil, seguem as seguintes normas, procedimentos e métodos de ensaios:

- ✓ NBR 10.004 - Resíduos Sólidos – Classificação: Classe I (perigosos), Classe II-A (não inertes) e Classe II-B (inertes) - (ABNT, 2004a);
- ✓ NBR 10.005 - Lixiviação de Resíduos – Procedimentos (ABNT, 2004b);
- ✓ NBR 10.006 - Solubilização de Resíduos Sólidos – Métodos de ensaios (ABNT, 2004c);
- ✓ NBR 10.007 - Amostragem de Resíduos – Procedimentos (ABNT, 2004d).

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 (ABIFA, 1999).

De acordo com a Norma 10004/2004 (ABNT, 2004a), para ser classificado como resíduo perigoso tem que constar nos anexos A ou B da mesma e/ou apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou

patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental.

Segundo Barros (2013), é muito importante o conhecimento das características químicas através das análises dos extratos lixiviados e solubilizados para avaliar a periculosidade dos resíduos sólidos.

Devido aos problemas sobre a gestão dos excedentes de areia de fundição e a falta de legislação específica para o setor, foi criada em setembro de 2007 junto à ABNT, o Comitê Brasileiro de Fundição ABNT/CB-59, tendo como âmbito de atuação a “normalização no campo da fundição compreendendo fundição de ferro, de aço e de não ferrosos, insumos, matéria-prima, resíduos no que concerne à terminologia, requisitos, métodos de ensaio e generalidades” (ABIFA, 2008). Foi instalada a Comissão de Estudos Resíduos de Fundição ADF (59:001.01), tendo como escopo a “normalização referente aos resíduos de fundição no que concerne a tratamento, utilização, reaproveitamento, armazenamento e transporte”, que gerou inicialmente, dois projetos de estudo sobre as areias descartadas de fundição (ABIFA, 2008).

O projeto de Nº 59.001.01 deu origem à norma em vigor desde 05 de junho de 2009 ABNT NBR 15702/2009 que dispõe “diretrizes para aplicação de areias descartadas de fundição de fundição ADF como matéria prima em concreto asfáltico e cobertura de aterro sanitário” (ABNT, 2009a).

O Projeto de Nº 59.001.01-002 deu origem a norma NBR 15984/ 2011 em vigor desde 27 de outubro de 2011- “Areia Descartada de Fundição – Central de Processamento, armazenamento e destinação CPAD” (ABNT, 2011).

Encontra-se em fase de análise das observações feitas, após a consultoria nacional para a votação, o Projeto Nº 59.001.01-003 – “Areia Descartada de Fundição – Diretrizes para aplicações geotécnicas confinadas e construção civil” (ABIFA, 2015b).

2.5.2 Leis Estaduais

Alguns estados possuem leis e normas específicas para a ADF segundo Art. 17 da Lei 12305/2010 (BRASIL, 2010a).

➤ Estado de São Paulo

Em São Paulo existe uma regulamentação para o gerenciamento de Areias Descartadas de Fundição, incluindo a aplicação em asfalto e artefatos de concreto (ABIFA, 2008)

- Decisão de Diretoria CETESB Nº 152/2007 (SÃO PAULO/CETESB, 2007). “Dispõe sobre procedimentos para gerenciamento de areia de fundição”.

O conceito de Produção e Consumo Sustentáveis (PCS) é parte integrante da gestão ambiental da CETESB. Desta forma incentiva as empresas a reduzir o consumo de matérias-primas, água e energia, minimizando a geração de resíduos sólidos e consequentes impactos ambientais.

➤ Estado do Paraná

- Resolução SEMA Nº 016/2014 – “Critérios para qualidade do ar, padrões de emissão para fundição de metais” (PARANÁ/SEMA, 2014).
- ✓ Portaria IAP Nº 224/2007 – “Critérios para exigência e emissão para Autorizações ambientais Para Atividades de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, envolve procedimentos de transporte, armazenamento e disposição final dos resíduos no Estado do Paraná” (PARANÁ, 2007).

➤ Estado de Santa Catarina

- ✓ Resolução CONSEMA nº 026/2013 – “Estabelece diretrizes sobre a utilização das areias descartadas de fundição – ADF e adota outras providências” (SANTA CATARINA/CONSEMA, 2013).

➤ Estado de Minas Gerais

- ✓ Deliberação Normativa nº 196/2014 – “Dispõe sobre a utilização da areia descartada de fundição na produção de artefatos de concreto sem função estrutural” (MINAS GERAIS/COPAM, 2014).

2.5.3 Leis Municipais

A Lei 12305/2010, seção IV, sobre Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) no Art. 19, contém os seguintes passos (BRASIL, 2010a).

I - diagnóstico da situação dos resíduos sólidos gerados no município;

II - identificação de áreas favoráveis para disposição final;

III - identificação das possibilidades de consórcio com outros municípios;

IV - identificação dos resíduos sólidos e dos geradores sujeitos a plano de gerenciamento específico como resíduos perigosos, resíduos de construção civil entre outros.

No município de Itajubá, MG, o Plano de Gestão de Resíduos Sólidos faz parte de uma das vertentes do Plano Municipal de Saneamento Básico. Até o presente momento, dezembro de 2016, encontra-se em fase de elaboração (ITAJUBÁ/PMI, sd).

Existem estudos sobre a co-disposição de resíduos sólidos industriais classificados como não perigosos, Classe II, em aterros de resíduos sólidos urbanos/domiciliares. Em alguns municípios, como Catanduva, SP, estas ações são permitidas.

Seguindo este conceito da co-disposição as ADF, classe II, poderiam ser usadas como cobertura de aterros urbanos/domiciliares.

2.6 Generalidades sobre o Concreto

O concreto é usado na grande maioria das obras de construção civil, mesmo que sejam em madeira ou estrutura metálica, em obras hidráulicas e sanitárias, barragens, pontes, estradas e túneis.

Para avaliar a possibilidade do uso do resíduo Pó de Fundição como substituto parcial do agregado miúdo em concreto, é necessário compreender as suas características e propriedades.

2.6.1 Vantagens e Desvantagens

A seguir, são listadas as vantagens e desvantagens do uso do concreto na construção civil.

- As vantagens são: ter boa resistência mecânica, devido aos materiais componentes serem facilmente encontrados, ser durável, versátil, exigir pouca manutenção, além de apresentar características de segurança e a viabilidade técnico-econômica.
- As desvantagens são: ter peso próprio elevado, por possuir baixa resistência à tração e ser material de difícil reforma e adaptação (ANDOLFATO, 2002; PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

2.7 Concreto e seus componentes

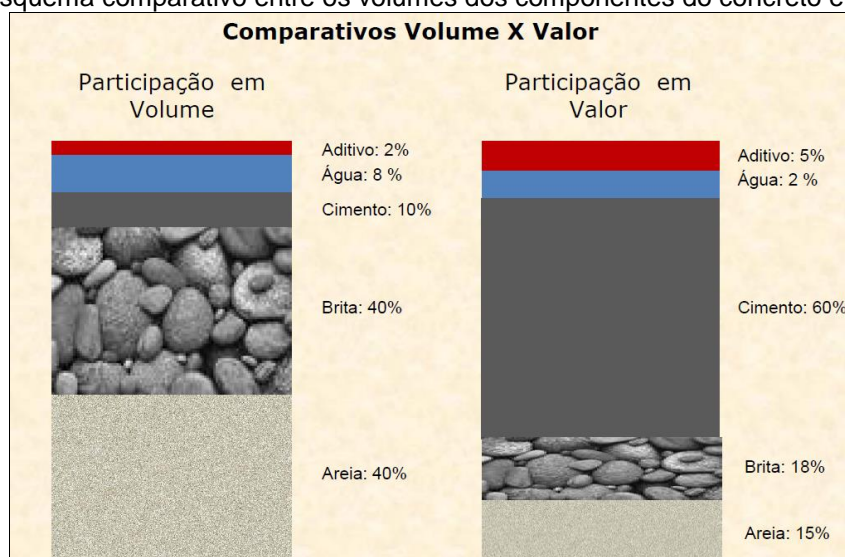
O concreto pode ser classificado como simples ou armado. O concreto simples é um material de construção composto por cimento, agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia) e água. Em alguns casos, adicionam-se aditivos que modificam suas características físicas e químicas (ALMEIDA, 2002). O concreto simples tem boa resistência mecânica à compressão e baixas resistências à tração e flexão. O concreto armado contém ferragens de aço para garantir as resistências mecânicas à tração e flexão.

Dentre os componentes do concreto, o cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais (GIONGO, 2007). Resulta da mistura de calcário ($\text{CaCO}_3 + \text{MgO}$), argila ($\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$ e Fe_2O_3) e gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que são

dosadas e levadas a altas temperaturas para obtenção do clínquer. Este passa pelo processo de moagem e depois são adicionados sulfato de cálcio e gesso para regular a pega (SOUZA JUNIOR, 2003, WATANABE, 2004). A água deve ser isenta de impurezas que possam prejudicar as reações com cimento (SOUZA JUNIOR, 2003). Os agregados são materiais granulares sem forma e volume definidos, sendo suas dimensões e propriedades de acordo com aplicação nas obras de engenharia, como pedra britada, cascalho e areia (LA SEMA; 2009). São minerais, geralmente, inertes (não reagem com o cimento), compõem 60% a 80% da mistura de concreto e representam 15% a 30% do custo, o que tem sentido econômico, pois o agregado é mais barato que o cimento (ANDOLFATO, 2002) como ilustrado na Figura 7. Os Aditivos são substâncias que podem ser adicionadas à argamassa para melhorar certas características como: resistência, impermeabilidade, trabalhabilidade, retardamento ou aceleração de pega e diminuição de retração (SOUZA JUNIOR, 2003).

Logo que se misturam, os agregados graúdos e miúdos com cimento e água, inicia-se a reação química do cimento com a água, de hidratação, formando uma massa coesiva, o gel cimento incluindo os poros de gel, sendo a porosidade característica de 28%. Durante a mistura do concreto, o gel envolve os agregados endurecendo-os gradativamente formando cristais, resultando em um material resistente e monolítico (GIONGO, 2007).

Figura 7- Esquema comparativo entre os volumes dos componentes do concreto e seus valores



Fonte: VALVERDE e TSUCHYIA, 2007

A ABNT NBR 7211/2005 (ABNT, 2005) fixa as características exigidas para os agregados usados em concreto e classifica a areia conforme a sua granulometria (Tabela 2), ou seja, a distribuição das partículas entre várias dimensões expressa em porcentagens (FOGUESATTO, 2007).

- ✓ Agregado Miúdo: são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, no ensaio realizado em conformidade com a ABNT NBR NM 248 (ABNT,2003), com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISSO 3310-1” (ABNT NBR 7211/2005; ABNT, 2005).

A Dimensão Máxima corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta porcentagem retida acumulada igual imediatamente inferior a 5% em massa.

Tabela 2 - Classificação granulométrica para areia

Abertura das peneiras (mm)		% em massa retida e acumulada			
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Nº	mm	Muito fina	Fina	Média	Grossa
0	9,5	0	0	0	0
2	6,3	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4	4,8	0 a 5 (A)	0 a 10	0 a 11	0 a 12
8	2,4	0 a 5 (A)	0 a 15 (A)	0 a 25 (A)	5(A) a 40
16	1,2	0 a 10 (A)	0 a 25 (A)	10(A) a 45(A)	30(A) a 70
30	0,6	0 a 20	21 a 40	45 a 65	66 a 85
50	0,3	50 a 85 (A)	60 (A) a 88 (A)	70 (A) a 92 (A)	80 (A) a 95
100	0,15	85 (B) a 100	90 (B) A 100	90 (B) a 100	90 (B) a 100

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 7211/2005; ABNT, 2005).

Quanto ao tamanho de seus grãos, a NBR 7225 (ABNT, 1993) classifica a areia em faixas granulométricas (Tabela 3).

Tabela 3 - Classificação da areia quanto ao tamanho dos grãos (mm)

	NBR 7225/1993 (ABNT, 1993)	Bauer, 2008
Areia Fina	0,075 a 0,42 mm	0,15 a 0,6 mm
Areia Média	0,42 a 1,2 mm	0,6 a 2,4 mm
Areia Grossa	1,2 a 2,4 mm	2,4 a 4,8 mm

Adaptada pelo autor

A NBR 7211 (ABNT, 2005), Andolfato (2002) e Assunção (2009), apresentam valores de módulo de finura para areias consideradas bem graduadas, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação da areia quanto ao módulo de finura (mm)

Classificação	NBR 7211	Andolfato	Assunção
Muito fina	1,39	<1,97	<2,0
Fina	1,71 a 2,85	1,97 a 2,4	2,0 a 2,4
Media	2,11 a 3,38	2,4 a 3,35	2,4 a 3,2
Grossa	2,71 a 4,02	3,35 a 4,05	>3,2

Fonte: Adaptada pelo autor

- ✓ Agregado Graúdo: aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e permanecem retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio efetivado de acordo com a ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003), com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISSO 3310-1" (ABNT NBR 7211/2005).

Conforme suas dimensões, os agregados graúdos são classificados como indica a Tabela 5.

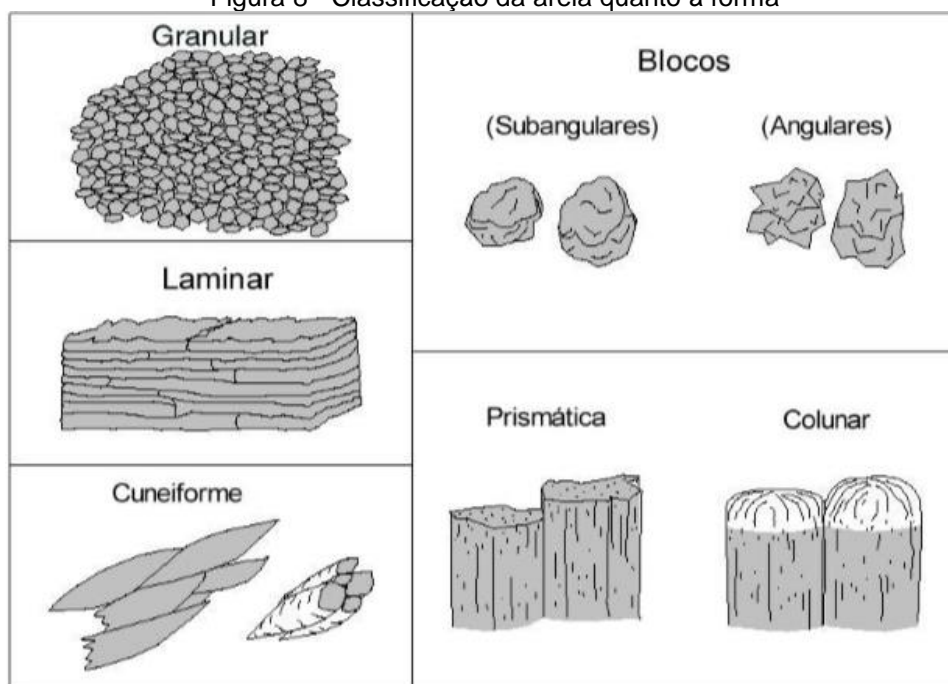
Tabela 5 - Dimensões do agregado graúdo

Tipo	Brita 0	Brita 1	Brita 2	Brita 3	Brita 4	Brita 5
Dimensões (mm)	4,8 a 9,5	9,5 a 19	19 a 25	25 a 30	50 a 76	76 a 100

Fonte: WATANABE (2004)

Quanto às formas, os agregados são classificados como as partículas dos solos indicadas na Figura 8.

Figura 8 - Classificação da areia quanto à forma



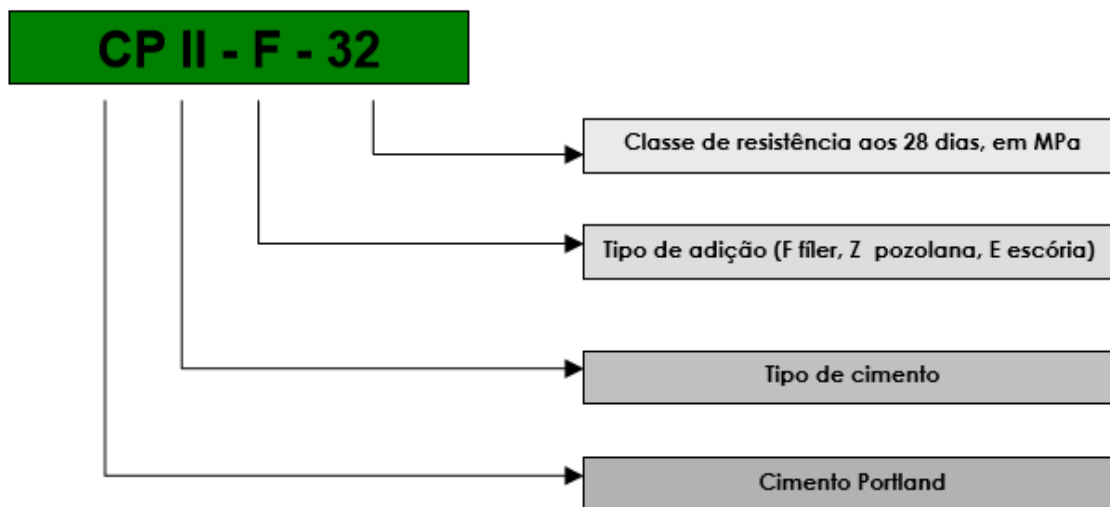
Fonte: Salomão, 2010

Em média, a massa específica da areia comum é $2,6 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária solta é $1,4 \text{ g/cm}^3$ e para a Brita estes respectivos valores são $2,7 \text{ g/cm}^3$ e $1,5 \text{ g/cm}^3$ (FREITAS JR., 2013).

2.7.1 Classificação e aplicações do cimento

Os vários tipos de cimento são designados pela sigla e pela classe de resistência. As siglas correspondem ao prefixo CP, Cimento Portland, acrescido dos algarismos romanos de I a V, conforme o tipo do cimento com seus componentes e as classes indicadas pelos números que são os valores mínimos de resistência à compressão após 28 dias de cura (Figura 9). A sua escolha é feita de acordo com as propriedades estruturais desejadas e o meio onde será aplicado.

Figura 9 - Classificação do cimento



Fonte: Martins *et al.*, 2008

No Brasil são fabricados os seguintes tipos de cimento com especificação segundo a ABNT e as suas principais propriedades decorrem dos seus constituintes (ABCP, 2002).

1. Cimento Portland Comum CP I – Sem qualquer adição de gesso, indicado para uso em concreto geral, sem exposição a sulfatos do solo e águas subterrâneas ou agressivas.
2. Cimento Portland Composto CP II – Indicado para lançamentos de grande volume de concreto com superfície pequena, concreto simples, armado e protendido, pré-moldados e artefatos; possui melhor resistência ao ataque de sulfatos. Subdivide-se em:
 - a. CP IIZ – Pozolâmico – para concretos subterrâneos, marítimos, industriais. É mais impermeável e mais durável.
 - b. CP IIE – Escória – Possui baixo calor de hidratação
 - c. CP IIF – Carbonático Filler – indicado para aplicações gerais, argamassas de assentamento e revestimento, concreto simples e armado, pré-moldados.
3. Cimento Portland de Alto Forno CP III – É mais impermeável e durável, possui baixo calor de hidratação. Aplicações gerais, mais indicados para barragens, obras de grandes dimensões, ambientes agressivos, pavimentação, aeroportos e concretos asfálticos.

4. Cimento Portland IV – Especialmente para obras expostas à ação da água corrente e ambientes agressivos.
5. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial CP V ARI – Recomendado para artefatos de cimento, tijolos, alvenaria, blocos, pavimentação ou aplicações que necessitam de alta resistência inicial e desforma rápida.
6. Cimento Portland Resistente aos Sulfatos CP RS – Para meios agressivos, rede de coleta e estações de tratamento de esgotos, água do mar e solos.
7. Cimento Portland Baixo Calor de Hidratação CP BC – Peças de grande massa de concreto.
8. Cimento Portland Branco CP B - Rejuntes

Cada tipo de cimento ainda é classificado conforme sua resistência a compressão:

- CP I, CP II e CP III - As classes de resistência a compressão aos 28 dias são 25, 32 e 40 MPa;
- CP IV – As classes de resistência são de 25 e 32 MPa;
- CP V – Resistência a compressão aos 7 dias de 34 MPa;
- CP RS e CP BC – As classes de resistência a compressão aos 28 dias de 25 e 32 MPa (ABCP, 2002)

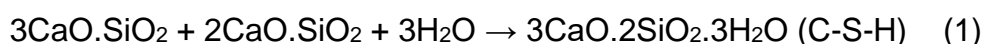
2.7.1.1 Hidratação do Cimento

Os principais compostos do cimento são: Silicato tricálcico (C_3S), Silicato Dicálcico (C_2S), Aluminato Tricálcico (C_3A) e Ferro-Aluminato Tricálcico (C_3AF) (WATANABE, 2004). Durante a hidratação, estes compostos influenciam na resistência mecânica da seguinte forma (WATANABE, 2004):

- Até 3 dias a resistência mecânica se dá pela hidratação dos aluminatos e silicatos tricálcicos: $3CaO.Al_2O_3$ e $3CaO.SiO_2$.
- Entre 3 e 7 dias, o aumento de resistência é assegurada pelo aumento da hidratação de $3CaO.SiO_2$;
- Entre 7 e 90 dias, a hidratação do $3CaO.SiO_2$ e $2CaO.SiO_2$) é responsável pelo aumento de resistência;

- Acima de 90 dias, o aumento de resistência ocorre devido a hidratação de $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (WATANABE, 2004).

O Silicato Tricálcico ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$) e o Silicato Dicálcico ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) formam micro cristais de Dissilicato Tricálcico hidratado ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$), que é o elemento principal responsável pela resistência do concreto, dada pela Equação 1 (GIONGO, 2007):



As características dos principais compostos hidratados do cimento encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2 - Principais compostos hidratados do cimento

COMPOSTOS	CARACTERÍSTICAS
Silicatos Hidratados C-S-H	Representa 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada. São estes compostos os responsáveis pela resistência da pasta a esforços mecânicos.
Hidróxido de cálcio Ca (OH) ₂	Ocupa 20 a 25% do volume de sólidos da pasta. Sua morfologia é bem definida, formando cristais prismáticos, sendo que o tamanho dos cristais aumenta conforme também aumenta o espaço livre (aumento da relação água/cimento). O hidróxido de cálcio não contribui para a resistência da pasta de cimento endurecida e em virtude de sua baixa superfície específica, que lhe confere um baixo poder de adesão, é facilmente carregado pela água.
Sulfoaluminatos de cálcio Ou Monossulfato hidratado C ₆ AS ₃ H ₃₂ (Etringita)	A etringita e/ou monossulfato de cálcio ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos da pasta hidratada. A etringita é responsável pelo fenômeno da pega e desenvolvimento da resistência inicial. Pode tornar-se instável e decompor-se para formar o monossulfato hidratado, mais estável.
Porosidade	A porosidade total da pasta de cimento Portland fica entre 25 e 30% em volume para uma relação a/c de 0,5. Esta porosidade é decomposta em tipos de cavidade ou vazios: poros entre os cristais C-S-H, poros capilares entre os compostos hidratados, bolhas e fissuras.

Fonte: METHA e MONTEIRO, 1994

2.7.2 Microestrutura

O concreto é um composto com estrutura bastante heterogênea (METHA; MONTEIRO, 1994). Possui duas fases: A pasta de cimento hidratada e os agregados, e em função disto as propriedades são regidas pelas propriedades das fases e pela interface entre elas (NEVILLE; BROOKS, 2013). Os agregados podem ser compostos de vários minerais e conter muitos vazios; a pasta de cimento contém uma distribuição variada de fases, poros e microfissuras e ainda sofre modificação com o tempo, umidade do ambiente e temperatura, o que o torna diferente dos outros materiais de engenharia (WATANABE, 2004). A heterogeneidade é condicionada às reações de hidratação do cimento (GIONGO, 2007).

No estudo de deformabilidade do concreto é preciso considerar a heterogeneidade da matriz da argamassa ligada às reações de hidratação do cimento (GIONGO, 2007).

2.7.3 Traço ou Dosagem

O traço ou dosagem é a proporção entre os componentes do concreto. Contém as quantidades de cimento, areia, brita, água e aditivos, visando obter trabalhabilidade adequada, no estado fresco, e resistência e durabilidade, no estado endurecido. Quanto maior a proporção de cimento, maior a resistência do concreto (MOREIRA, 2004)

O traço do concreto pode ser obtido das seguintes formas:

- ✓ Traço em massa: unidade de massa de cimento.
- ✓ Traço em volume: por saco de cimento.
- ✓ Traço pela massa de cada componente pelo volume, em metro cúbico, de concreto.

A dosagem em massa é o método mais preciso. O tipo de cimento é escolhido a partir da resistência desejada e aplicação do concreto; o fator água / cimento

depende do meio onde será utilizado e a dimensão máxima da brita é determinada em função da dimensão das peças a serem concretadas.

2.7.4 Especificação do concreto

A especificação do concreto é feita de acordo com as propriedades requeridas no projeto e indicada de duas maneiras:

- ✓ Resistência (em MPa): é a mais comum. A norma brasileira estabelece que se especifique a resistência característica, a dimensão máxima do agregado e abatimento.
- ✓ Consumo ou traço: Especifica o consumo de cimento (kg/m^3), a dimensão máxima do agregado e o abatimento

A Resistência à compressão simples denominada f_{ck} , é a resistência característica do concreto pela qual são definidas na norma NBR 8953 (ABNT, 2015) as classes do concreto.

➤ Classes de Resistência do Concreto e Aplicações

Os concretos são classificados pela Norma ABNT 8953 (ABNT, 2015) em grupo I e grupo II conforme a resistência característica à compressão (f_{ck}) e designados pela letra C seguida do valor da resistência em MPa.

- Grupo I – variam de 20 a 50 MPa
- Grupo II – de 55 a 80 MPa (alta resistência)

Assim, C20 significa que o concreto tem resistência f_{ck} de 20 MPa.

As aplicações para cada classe de resistência são descritas a seguir:

- C20 – Pequenas estruturas ou residências em que as estruturas sejam revestidas;
- C25 a C30 – Construções prediais em geral, em que se requer baixas deformações e permeabilidade; em concreto aparente;
- C30 a C40 – Concreto protendido e edifícios com sistemas estruturais não convencionais;

- C40 a C50 – Casos especiais em que se deseja esbeltez dos elementos estruturais, como edifícios altos e cascas; é usado especialmente, em pilares de edifícios altos.

2.8 Propriedades do Concreto

O concreto deve ser analisado nos estados fresco e endurecido. Sendo considerado no estado fresco, o período inicial da solidificação e endurecido, quando a pasta se solidifica completamente.

2.8.1 Propriedades do concreto fresco

As propriedades no estado fresco, trabalhabilidade, consistência e exudação, são descritas a seguir.

a) Trabalhabilidade é uma característica da argamassa para que seja adequadamente misturada e adensada sem perda de homogeneidade e depende de alguns fatores internos e externos (GIONGO, 2007).

b) Consistência está relacionada com a mobilidade da argamassa e coesão entre os elementos que a constituem dando uniformidade e compacidade ao concreto (ALMEIDA, 2002). É o maior ou menor grau de fluidez da mistura fresca calculado pelo teor de água/materiais secos (A%). Determinada, na obra, pelo processo *Slump test*, que deve estar de acordo com as dimensões da peça, distribuição da armadura, processo de lançamento e adensamento conforme NBR 67/1998 (ABNT, 1998; EFFTING, 2014).

➤ Em função de sua consistência, o concreto é classificado em:

- Seco ou úmido - quando a relação água/materiais secos é baixa, entre 6 e 8%;
- Plástico - quando a relação água/materiais secos é média, entre 8 e 11%;
- Fluido - quando a relação água/materiais secos é alta, entre 11 e 14%.

c) Exudação é a tendência de a água de amassamento vir até a superfície produzindo grande porosidade no concreto, diminuindo a resistência. Pode ser controlada

evitando o uso de água além do necessário. É reduzida com a adição de finos (ALMEIDA, 2002).

2.8.1.1 Fatores que afetam a trabalhabilidade:

Os fatores passíveis de alterar a trabalhabilidade do concreto são, dentre outros, a consistência, o traço e granulometria, conforme se segue.

- Consistência: relação água / secos; maior ou menor grau de fluidez da mistura fresca.
- Traço: proporção cimento/agregados;
- Granulometria: proporção agregados graúdo/miúdo; a deficiência em material fino produz concreto difícil de trabalhar e o excesso consome mais água, causando maior retração.
- Forma dos grãos: agregados com grande quantidade de partículas chatas e alongadas resultam em uma argamassa de péssima trabalhabilidade.
- Aditivos plastificantes e superplastificantes.
- Além dos fatores externos como: tipos de mistura (manual ou mecânica), transporte, lançamento, adensamento (manual ou vibratório) e dimensão da peça e armadura. Tomando o cuidado para que não ocorra segregação, ou seja, separação entre agregados e a pasta que podem causar enfraquecimento da aderência pasta/agregados, aumento da permeabilidade e diminuição da resistência mecânica (EFFTING, 2014).

Para proporcionar trabalhabilidade à mistura é necessário o dobro de água em relação à quantidade consumida na reação química de hidratação do cimento. Neste caso, seria suficiente a relação a/c na ordem de 0,28; no entanto, a fim de melhorar a consistência do concreto, essa relação é da ordem de 0,45 a 0,60. Uma parte do excesso de água é evaporável e o restante da água de amassamento, chamado de água capilar, permanece na matriz formando uma rede capilar (GIONGO, 2007).

2.8.2 Propriedades do concreto endurecido

As propriedades do concreto endurecido dependem fundamentalmente, das propriedades dos materiais, das proporções das misturas e método de preparo. A mistura deve ser homogênea, uniforme e adensadas, de forma a obter o concreto o mais denso possível. Além disso deve se ter os cuidados na cura para evitar a perda de água nos primeiros dias (MOREIRA, 2004).

As principais propriedades são: massa específica, índice de vazios (durabilidade e permeabilidade), estabilidade dimensional, módulo de elasticidade e resistência mecânica (EFFTING, 2014).

- A massa específica depende do adensamento dos agregados utilizados na mistura e varia entre 2100 kg/m^3 a 3000 kg/m^3 . Para um concreto simples é adotado 2400 kg/m^3 e para concreto armado adota-se 2500 kg/m^3 (EFFITIG, 2014; NBR 6118, 2014; ABNT, 2014).
- A permeabilidade é a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido. Está associada a porosidade ou índice de vazios e constitui 1% a 10% da mistura. Quanto menor for a relação a/c, menor a permeabilidade contribuindo para a durabilidade do concreto (EFFTING, 2014).
- Durabilidade é a capacidade de resistir a ação do tempo, aos ataques químicos, efeito de abrasão ou qualquer outra ação de deterioração (EFFTING, 2014). Considerada um dos fatores mais importantes para o projeto de estrutura, está relacionada com especificação de materiais, projeto, mão de obra, efeitos ambientais, acidentes e reparos. A deterioração pode ocorrer devido a fatores externos e internos, ações físicas, químicas e/ou mecânicas. No concreto armado, por exemplo, a deterioração normalmente envolve circulação de gases agressivos e/ou líquidos através das áreas próximas à superfície do concreto que possui um elevado grau de porosidade. A fim de reduzir a porosidade, busca-se produzir um concreto mais denso e menos permeável e o uso de ADF melhora estas características (SIDDIQUE; KADRI, 2011).
- Estabilidade dimensional: retração, ou redução do volume em razão da redução do teor de água (EFFTING, 2014). A retração acontece mesmo na ausência de tensões mecânicas, nas reações químicas do cimento durante o endurecimento

do concreto e pela evaporação da água superficial. Expansão ou aumento do volume em peças submersas (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

- Módulo de elasticidade: relação entre a tensão e deformação. Quando por um determinado intervalo de tempo for considerada linear, ou seja, a deformação será proporcional a tensão (Lei de Hooke) e dada pela fórmula $\sigma = \varepsilon \times E$. Quando a tensão não for proporcional à deformação, o módulo de elasticidade pode ser obtido pela tangente da curva gerada durante a aplicação da força (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004). A deformação do concreto é aproximadamente 3,5% independentemente do tipo de concreto (MOREIRA, 2004). Pode ser estimado, quando não for determinado experimentalmente, pela fórmula: $E_c = 5600 \cdot F_{ck}^{1/2}$ (MPa), para concreto de resistência característica, F_{ck} , entre 20 a 50 MPa segundo a NBR 6118/2014 (ABNT, 2014).
- Resistência mecânica: Compressão, tração e flexão.

As principais propriedades mecânicas do concreto são resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade; no entanto, a resistência à compressão é a característica mais importante, pois o concreto apresenta baixa resistência à tração e flexão. Além disso, a resistência à compressão serve como um indicativo para todos os outros tipos de resistência. A resistência à tração na flexão é da ordem da quinta parte da resistência à compressão e a resistência à tração simples, dimensionada por compressão diametral, equivale de 7 a 10% da compressão axial. (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004, MOREIRA, 2004).

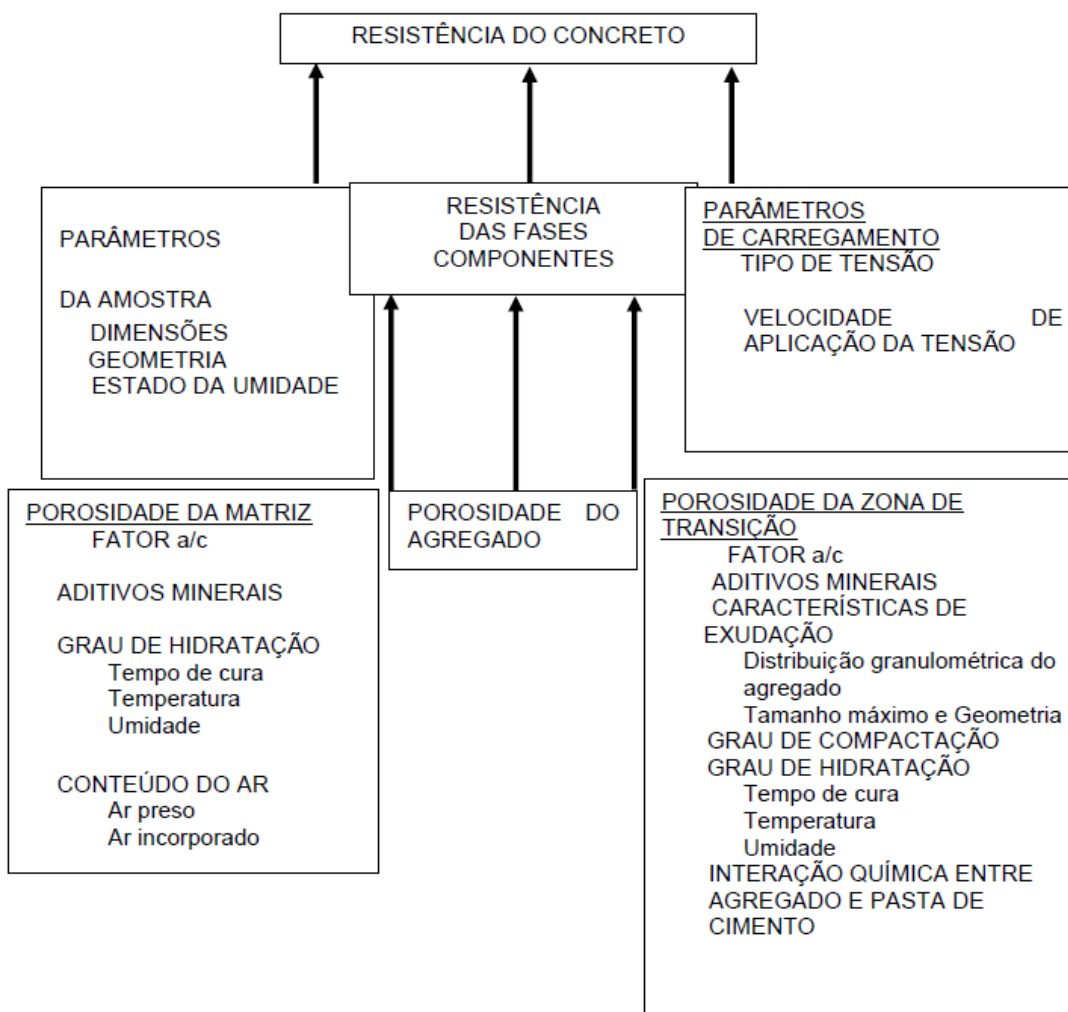
2.8.3 Resistência Mecânica do Concreto

Considerada a propriedade fundamental do concreto (SOUZA JUNIOR, 2003; ALMEIDA, 2002) é a capacidade do material de suportar as cargas aplicadas sem que entre em colapso. Depende da relação água /cimento que juntamente com o grau de hidratação do cimento determinam a porosidade da pasta endurecida (GIONGO, 2007). Aos 28 dias a argamassa atinge 75% a 90% da sua resistência total (EFFTING, 2014).

2.8.3.1 Fatores que influenciam na Resistência Mecânica:

São muitos os fatores que influenciam na resistência mecânica do concreto e a Figura 10 ilustra a interação entre eles.

Figura 10 - Fatores que influenciam na resistência do concreto

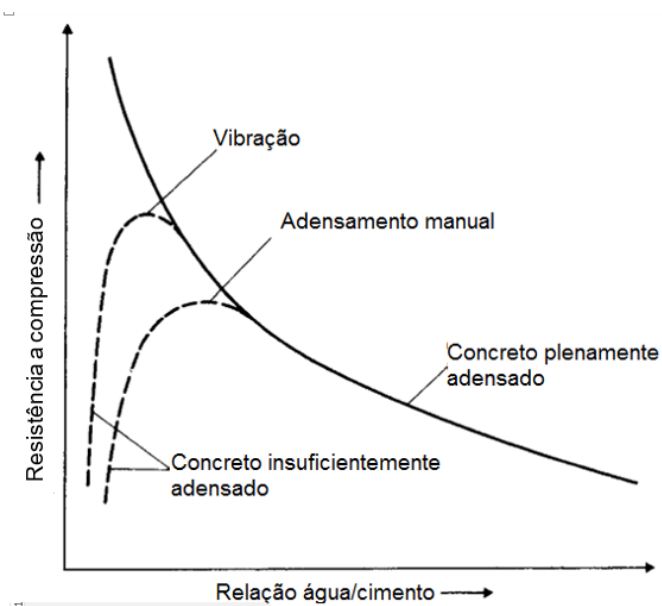


Fonte: Metha e Monteiro, 1994

Apresentam-se os seguintes fatores que podem interferir na resistência do concreto (EFFTING, 2014; WATANABE, 2004):

- Fator água / cimento: Quando o concreto está plenamente adensado considera-se que quanto menor a/c , maior a resistência (Figura 11). No entanto, deve-se ter um mínimo de água necessária para reagir com o cimento e dar trabalhabilidade ao concreto (EFFTING, 2014).

Figura 11 - Dependência entre a resistência do concreto e a relação a/c



Fonte: NEVILLE; BROOKS, 2013

- Tipo e teor de cimento.
- Água: quantidade mínima para reagir com o cimento e dar trabalhabilidade.
- Agregados: aderência a pasta de cimento depende da forma, textura e natureza dos agregados.
- Cura: manter o concreto saturado durante a hidratação do cimento.
- Grau de hidratação: idade.
- Tipo de solicitação.
- Forma e dimensão do Corpo de prova (Cp): Cp com maiores dimensões, maior volume de concreto e conseqüentemente maior índice de vazios apresenta resistência menor (EFFTING, 2014; WATANABE, 2004).

2.9 Influência dos Agregados nas Propriedades do Concreto

As propriedades do concreto são alteradas pelas características dos agregados.

a) Resistência à compressão

A resistência do agregado não deve ser levada em conta na resistência do concreto porque a partícula do agregado é mais resistente que a matriz e a zona de transição. Em consequência disto, a ruptura é determinada pelas outras fases. No entanto, outras propriedades do agregado como tamanho, forma, textura, granulometria e mineralogia influenciam na resistência mecânica do concreto (GIONGO, 2007).

Misturas contendo agregados grandes requerem menos água de amassamento que aquelas que contêm agregados menores. No entanto, agregados grandes formam zonas de transição mais fracas (GIONGO, 2007).

Pesquisas recentes mostram que ocorre um aumento na resistência do concreto com aumento na quantidade de agregados miúdos, a fim de ocupar os espaços vazios entre os grãos. Esses agregados constituídos por pós reativos como, areia muito fina, pós de quartzo e sílica ativa possibilitaram o alcance da resistência à compressão na ordem de 200 MPa (GIONGO, 2007).

A forma e a textura influem diretamente na ligação pasta/agregado, devido a diferença da área específica. Partículas que tendem à forma cúbica apresentam maior área específica do que as que se aproximam da forma arredondada. Da mesma forma, quando a textura superficial é rugosa, a resistência mecânica do concreto aumenta consideravelmente, sobretudo nos esforços de tração na flexão (EFFTING, 2014).

Metha e Monteiro (1994) afirmam que a composição mineralógica dos agregados também influencia na resistência, ou seja, agregados a base de sílica causam um aumento substancial na resistência do concreto em relação agregados a base de calcário.

A sílica ativa com alto teor de SiO_2 , superior a 80%, reduz a permeabilidade e corrosão, com poros menores forma uma estrutura mais densa. Melhora a aderência pasta/agregado, aumenta a reação com os produtos de hidratação do cimento (CSH) aumenta a resistência, diminui a lixiviação e aumenta a resistência a abrasão.

b) Fator água/cimento

A qualidade do concreto está diretamente relacionada com a relação água/cimento (WATANABE, 2004). Para um mesmo teor de cimento e mesma consistência do concreto, as misturas contendo partículas maiores de agregados necessitam de menor quantidade de água de amassamento, contudo, agregados grandes tendem a formar zonas de transição mais fracas que afetam mais a resistência à tração. Com a redução do tamanho do agregado graúdo, pode-se esperar que a razão entre a resistência de tração e a resistência à compressão aumente (GIONGO, 2007).

Quanto mais fino o grão do agregado, maior será a sua superfície específica, necessitando de maior quantidade de água de amassamento, o que interfere na resistência à compressão que tende a diminuir. Porém, esta pode ser melhorada com a adição de aditivos plastificantes reduzindo o fator a/c (GIONGO, 2007).

Tanto a relação a/c quanto o grau de hidratação do cimento determinam a porosidade da pasta endurecida.

c) Trabalhabilidade

A forma e granulometria dos grãos afetam a trabalhabilidade. Forma cuboide permite melhor trabalhabilidade que as lamelares e alongadas; Agregados muito finos necessitam de mais água para adquirir boa trabalhabilidade (FOGUESATTO, 2007; EFFTING, 2014).

d) Permeabilidade

Para se obter concreto menos permeável a mistura final deve ser mais densa com uma distribuição granulométrica contínua (FOGUESATTO, 2007). A redução da permeabilidade do concreto é importante para a sua durabilidade (EFFTING, 2014).

e) Higroscopia

A ascensão capilar diminui quando se usam areias mais grossas (FOGUESATTO, 2007).

f) Retração

Uma grande quantidade de finos exige maior quantidade de água de amassamento e conseqüente aumento da retração (EFFTING, 2014).

g) Durabilidade

O agregado deve ser inerte, ou seja, não deve reagir com outros componentes do concreto. A durabilidade está associada a permeabilidade que, por sua vez, em função da porosidade (FOGUESATTO, 2007).

A deficiência de material fino produz concreto árido e o excesso consome mais água e conseqüentemente, aumenta a retração. A quantidade de finos deve ser o suficiente para proporcionar trabalhabilidade, acabamento superficial, preenchimento interno entre os grãos e coesão (EFFTING, 2014).

2.10 ADF e as Propriedades do Concreto

O uso de ADF em substituição de 25%, 50% e 75% da areia natural como agregado com e sem aditivo superplastificante foi analisado por Foguesatto (2007), que concluiu que as peças com e sem o uso de aditivo e com 25% de ADF obtiveram resistência à compressão aos 28 dias maiores que a do traço referência, próximos a 40 MPa. No entanto, com substituição de 50% de ADF, apenas o traço sem aditivo atingiu resistência acima de 38 MPa e com aditivo os resultados foram inferiores a 35 MPa. Com 75% de ADF, a amostra não apresentou resistência de coesão e mostrou baixa trabalhabilidade (FOGUESATTO, 2007).

Siddique, Schutter e Noumowe (2009) analisaram as propriedades mecânicas da mistura de concreto em substituição parcial de 10%, 20% e 30% de ADF em concreto fresco e endurecido aos 28, 56 e 90 dias. Os resultados indicaram aumento

de resistência à compressão, flexão e do módulo de elasticidade do concreto de acordo com a adição do conteúdo de areia e avanço de idade da mistura.

Guney *et al* (2010) investigaram o reuso de ADF em concreto de alta resistência: 65 MPa. O agregado miúdo foi substituído nas proporções de 0%, 5%, 10% e 15% e foram estudadas as propriedades físicas e mecânicas da mistura. Com 10% de substituição, observaram melhor resultado de resistência. A absorção de água aos 28 e 56 dias diminuiu com o aumento do resíduo devido à diminuição dos vazios. Os autores (*op. cit.*) concluíram que o uso em porcentagens maiores pode causar efeitos desfavoráveis em razão da argila presente na mistura que provoca enfraquecimento da aderência agregado/cimento e aumento da quantidade de água. Guney *et al* (2010) afirmaram que o resíduo ADF diminui a fluidez e o abatimento do concreto devido a presença da argila e materiais finos que absorvem muita água. No entanto, até uma certa quantidade, que deve ser avaliada em função das características de cada processo, o resíduo diminui a porosidade do concreto e tem efeito favorável nas propriedades mecânicas e de impermeabilidade.

Da Silva *et al.* (2011) estudaram a influência da areia de fundição nas propriedades do concreto. Foram avaliados o concreto fresco quanto ao abatimento (*Slump*) e incorporação de ar e, no concreto endurecido, a tensão de compressão. Os resultados mostraram que o uso da ADF, nas proporções de 30, 40, 50, 65 e 80%, aumentaram o teor de ar e trincas, e diminuíram a resistência à compressão com relação ao concreto controle. Os autores relataram que a aplicação de ADF em misturas torna-se arriscada e menos durável, no entanto, acrescentam que não se pode generalizar já que a composição de ADF varia de acordo com o processo e, em todos os casos, devem-se fazer os testes.

Siddique *et al* (2011) estudaram o uso de ADF em diferentes porcentagens (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60%) como substituto parcial de agregados finos em concreto, e avaliaram quanto a resistência à compressão, durabilidade e resistência quanto à penetração de cloretos. As resistências à compressão com as misturas 30%, 40% e 50% foram maiores que o concreto sem mistura sendo que a resistência máxima foi obtida com 30% de ADF. Este aumento pode ser explicado devido a areia de fundição ser mais fina, resultando um concreto mais denso. No entanto, a queda de resistência com porcentagens maiores do resíduo pode ser

atribuída a não formação do gel C-S-H (hidratação do cimento). Quanto à durabilidade os autores (*op. cit.*) observaram que com o aumento da porcentagem de ADF e da idade do concreto houve boa resistência à carbonatação e à penetração rápida de cloretos.

Singh e Siddique (2012) analisaram cinco tipos de misturas contendo 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de areia residual de fundição, quanto as propriedades de resistência mecânica à compressão nas idades de 7, 28 e 91 dias, durabilidade (permeabilidade). Os resultados indicaram um aumento da resistência até 15%, devido ao concreto ser mais denso com a adição de finos. Com 20% houve uma redução na resistência pelo fato do aumento da área de superfície das partículas finas ter levado à redução do gel água/cimento dificultando a ligação entre agregados e cimento. A permeabilidade ao cloreto diminuiu com o aumento do teor ADF que reduziu os espaços vazios tornando a argamassa mais densa.

Khatib; Herki e Kenai (2013) analisaram as misturas com 0%, 30%, 60% e 100% de ADF quanto à absorção de água, resistência à compressão e velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU). Os autores observaram um aumento de absorção de água por capilaridade e diminuição na força de compressão com o aumento do resíduo. Isto pode ser causado pelo aumento da superfície de partículas finas que deve conduzir ao enfraquecimento da zona de interfacial ADF e pasta de cimento, porém a resistência adequada pode ser alcançada adicionando uma proporção ideal de ADF.

Prabhu; Hyun e Kim (2014) avaliaram utilização de areia de fundição em substituição parcial (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) de agregado miúdo na produção de concreto. Concluíram que devido ao módulo de finura e a elevada taxa de absorção de água pela ADF a trabalhabilidade é reduzida com o aumento da porcentagem de areia. Sugerem que com taxa de substituição do agregado miúdo de até 20% pode ser usado eficazmente na produção de concreto.

Siddique *et al.* (2015) compararam o uso parcial de 5%, 10%, 15% e 20% em duas misturas de concreto com resistências características de 30 MPa e 40 MPa quanto às propriedades de resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade, permeabilidade ao cloreto e velocidade de pulso ultrassônica aos 28, 91 e 365 dias. Observaram aumento de resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade

e diminuição na permeabilidade com o aumento da proporção de ADF até 15% em todas as idades, devido ao fato da redução de vazios na mistura. No entanto, com 20% apresentaram uma pequena diminuição nas resistências, embora maiores que o concreto controle sem adição de ADF; isto se deve ao aumento de finos que reduz o gel água/cimento. O aumento de resistência foi maior para argamassa de 30 MPa.

Com o objetivo de analisar a viabilidade do uso do pó residual de exaustão em concreto com substituição parcial de 10% e 20% e diferentes teores da relação água/cimento (0,55; 0,60 e 0,65), assim como, verificando a resistência mecânica à compressão, Santos *et al.* (2010) notaram que aos 28 dias a mistura de 10% de ADF e a/c 0,55, a resistência mecânica à compressão foi maior que na mistura sem areia residual. Santos (2011) estudou o resíduo nas proporções de 0; 7,5% e 15% com os teores de a/c 0,52; 0,54 e 0,56 em concreto convencional quanto a compressão e absorção de água e concluiu que o resíduo nestas proporções, pode ser usado para concreto convencional.

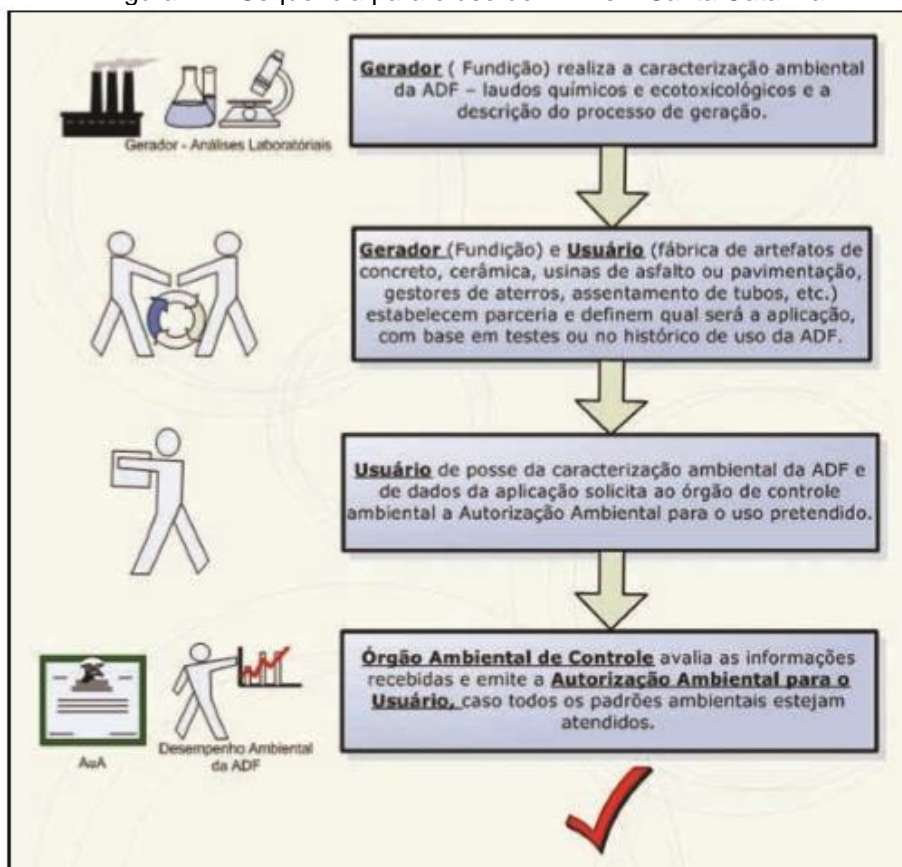
O Pó de Exaustão também foi avaliado e utilizado por Ribeiro *et al.* (2006) para a produção de compósitos cerâmicos e Knopp *et al.* (2009) em massas cerâmicas. Ribeiro *et al.* (2006) concluíram que resíduos siderúrgicos como ADF e Pó de Exaustão podem ser usados como excelentes materiais de construção civil; Knopp *et al.* (2009) ressaltaram que o resíduo melhora a sinterização da massa cerâmica, porém, aumenta a porosidade.

Pereira (2014) avaliou a resistência mecânica, aderência e durabilidade da argamassa para assentamento e revestimento de parede com o resíduo e alcançou as características desejáveis para seu assentamento. Dalla Valentina, Koch e Santos (2013) utilizaram o pó de exaustão em argamassas como substituto parcial do cimento Portland nas proporções de 0, 15 e 30% com fator a/c de 0,5. Os autores analisaram a resistência a compressão, flexão e atividade pozolânica, obtendo resistências próximas ao padrão com a mistura de 30%.

2.11 ADF em outras aplicações na Construção Civil

Em alguns estados, órgãos como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e o CONSEMA de Santa Catarina, criaram instruções normativas com procedimentos para o gerenciamento do uso de Areia de Fundição. Nos respectivos documentos, Resolução de Diretoria nº 152/2007/CE (SÃO PAULO, 2007) e Resolução CONSEMA nº 26/2013 (SANTA CATARINA, 2013), constam propostas para a reutilização do resíduo na fabricação de artefatos de cimento, matéria prima para rodovias, concreto asfáltico, redes de saneamento e assentamento de tubulações, trazendo uma economia significativa do âmbito econômico e de recursos naturais, além de beneficiar o meio ambiente, tanto na extração da areia natural, quanto na disposição do resíduo em aterros industriais. A partir de estudos científicos e aplicações piloto em construção civil foi desenvolvido um escopo de atividades previstas para o uso de ADF no estado (Figura 12).

Figura 12 - Sequência para o uso de ADF em Santa Catarina



Fonte: Chegatti; Carnin; Maçaneiro (2014)

Para pavimentação, Costa *et al.* (2010) estudaram o uso de ADF como agregado em misturas asfálticas e Pereira *et al.* (2005) em Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ). Os autores (*op. cit.*) concluíram que as misturas atingiram as especificações exigidas pelo DNIT 313/97. Watanabe (2004) analisou a influência da concentração de areia, 10%, 25%, 75% e 100%, nas propriedades mecânicas e nas características micro estruturais dos pavimentos fabricados por processo de vibração e vibro compressão. Foi observado pelo autor (*op. cit.*) que nos ensaios de lixiviação, análise de massa e solubilização, os resíduos apresentaram concentrações inferiores aos exigidos pela NBR 10005 (ABNT, 2004b) no ensaio de solubilização visando à classificação quanto à periculosidade e resistência mecânica de projeto, obtendo melhores resultados na concentração de 25%. Coutinho Neto e Fabbri (2004) comprovaram por meio dos resultados de ensaios de lixiviação e solubilização, que a ADF em massa asfáltica não desprende substâncias tóxicas não comprometendo o meio ambiente e, portanto, o reaproveitamento do resíduo em misturas asfálticas é viável tanto no que diz respeito ao meio ambiente quanto nas propriedades mecânicas de resistência à tração, módulo de resiliência e desgaste por abrasão.

A viabilidade técnica do uso de ADF na construção civil também foi avaliada pelos autores Pablos (2008) e Barros *et al.* (2013). O primeiro utilizou ADF na fabricação de tijolos para alvenaria, obtendo satisfatórios resultados mecânicos e ainda concluiu que, por meio do ensaio de lixiviação, que a bentonita sódica e sílica presentes colaboram para a fixação dos metais Al, Fe e Cr. O segundo realizaram ensaios com adição parcial de 10% e 20% do volume de agregados miúdos obtendo resultados com ganhos de resistência à compressão.

O emprego de areia de fundição em cerâmica vermelha foi avaliado por Frasson e Pellegrin (2012). Com relação a resistência à flexão, os autores observaram um ganho de 10% na resistência em comparação com cerâmica sem ADF, apenas na substituição parcial de 12%. Acima deste valor, 16%, 20%, 24% e 28%, os autores constataram perda da resistência. E em todos resultados de Frasson e Pellegrin (2012) notaram uma diminuição da retração linear após secagem e queima.

Barros (2013) afirma uso de ADF como cobertura em aterros sanitários, mas para isso devem ser seguidos os critérios da NBR 15702 (ABNT, 2009): não ser misturadas ou diluída com outro resíduo; apresentar pH no estado aquoso entre 5,0 e

12; atender às concentrações máximas no extrato lixiviado e solubilizado conforme NBR 10005 e 10006 (ABNT, 2004b; 2004c) e ser classificada como resíduo classe II, não perigoso.

Com base na revisão bibliográfica de Katcha; Nakum e Bhogayata (2014) puderam concluir que os pesquisadores avaliaram a adição de 10% a 100% de ADF em substituição de agregado miúdo para concreto e observaram que, na substituição de 20%, obtém-se uma resistência maior que o concreto referência, quanto ao comportamento do concreto fresco, e que a trabalhabilidade diminui com o aumento do teor de areia. Os autores (*op. cit.*) mencionam que na literatura, a maior parte dos autores notou mudanças positivas em termos de resistência à compressão e tração, com um aumento de até 20%, e não encontrou mudanças significativas no módulo de elasticidade, aumento na absorção de água e diminuição da penetração de íons de cloreto. E ainda, os autores concluíram que a incorporação de ADF às misturas pode ser feita adequadamente e que os efeitos no concreto se diferem devido às características das areias que variam de acordo com o processo e o tipo de metal fundido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A areia objeto da pesquisa é proveniente do sistema de exaustão de dois lugares da indústria em estudo: do setor desmoldagem localizado no Sistema Areia, e do setor de limpeza e rebarbação das peças, onde se retira a areia em contato com a peça fundida. Este resíduo denominado Pó de Exaustão, é a areia usada para caixa de moldagem das peças metálicas, porém com características físicas, granulometria e massa específica, diferentes. A indústria de autopeças localizada no Sul de Minas, descarta por volta de 3 t/dia do resíduo seguindo para depósito no Aterro de Resíduos Industriais, Resicontrol no município de Tremembé, SP.

O resíduo em estudo é composto por areia de quartzo (99% SiO_2), argila de Bentonita Natural (Silicato de Alumínio e Magnésio Hidratado), Barrilha leve (Carbonato de Sódio) para ativar a bentonita e carvão (Figura 13).

Figura 13 - Pó de Exaustão de ADF objeto da pesquisa



Fonte: Acervo do autor

3.1 Análise do Pó de Exaustão

A primeira parte do estudo objetivou detalhar os procedimentos experimentais para as caracterizações físicas, químicas e morfológicas do resíduo e analisar a viabilidade do material coletado para o uso em concreto segundo as Normas da ABNT.

- ✓ Ensaio de Granulometria; NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003);
- ✓ Massa Específica; NBR NM 52/2009 (ABNT, 2009b);
- ✓ Massa unitária e volume de vazios; NBR NM 45 (ABNT, 2006)
- ✓ Classificação quanto à periculosidade do resíduo (Lixiviação e Solubilização); NBR 10005 e 10006/2004 (ABNT, 2004a; 2004b);
- ✓ MEV (Micrografia Eletrônica de Varredura) – Análise morfológica, micro estrutural e composição química do material; aparelho Zeiss® Modelo EVO MA-15.
- ✓ Difração de raios X; composição mineralógica e fases do resíduo; aparelho Panalytical®, modelo Xpert-Pró

Os ensaios de distribuição granulométrica, massa específica e massa unitária são necessários para o cálculo do traço do concreto. (APENDICE A)

3.1.1 Granulometria

A distribuição granulométrica foi realizada em amostra seca em estufa a 105°C por 24h e verificada por meio do uso da sequência de peneiras da série normal de malhas 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; 0,15 mm e peneira intermediária de malha 0,075 mm (Figura 14). O Módulo de Finura foi determinado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras de série normal, dividida por 100. O Ensaio foi realizado no laboratório de Geotecnia da UNIFEI.

Figura 14 - Sequência de peneiras para ensaio de granulometria para agregados miúdos



Fonte: Acervo do autor

A distribuição do tamanho da partícula também foi analisada pelo Granulômetro a Laser, utilizando o aparelho Microtrac, S 3500, ilustrado na figura 15. A análise foi realizada no laboratório de Caracterização Estrutural da UNIFEI.

Figura 15 - Granulômetro a Laser



Fonte: Autor

3.1.2 Determinação da Massa Específica

Para determinar a massa específica do material, foram coletadas duas amostras do resíduo, 500 g, nas condições naturais de umidade a serem utilizados no concreto. Desta forma, seguiu-se o procedimento da Norma NM 52/2009 (ABNT, 2009) utilizando o Picnômetro (Figura 16) e foi realizado no laboratório de Materiais de Construção Civil da FEPI.

Figura 16 - Picnômetro para massa específica de agregados miúdos



Fonte: Autor

3.1.3 Determinação da massa unitária solta

A determinação da massa unitária foi realizada no laboratório de Materiais de Construção da FEPI, seguindo o procedimento da norma para Agregados NM 45 (ABNT, 2006), utilizando balança de marca Micheletti® (Figura 17) e haste de adensamento com 16 mm de diâmetro, 600 mm de comprimento e recipiente de latão cilíndrico com volume de 11,30 litros. O material foi colocado no recipiente em 3 camadas adensadas com 25 golpes cada. Para cálculo da massa unitária utilizou-se o método "A" da norma para agregados com dimensão máxima menor ou igual a 37,5 mm.

Figura 17 - Balança para cálculo da massa unitária do resíduo



Fonte: Autor

3.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Com o objetivo de analisar a morfologia das partículas e composição química do Pó de Exaustão, foi executado o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando o aparelho marca Zeiss® Modelo EVO MA-15 (Figura 18), realizado no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal de Itajubá.

Figura 18 - Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Autor

3.1.6 Difração de Raios X

A identificação das fases do resíduo foi feita por meio da Difração de raios X, aparelho PANalytical®, modelo Xpert-Pró (Figura 19), no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal de Itajubá. Comparando os picos gerados no difratograma com cartas do *software* XPert HighScore Plus (PANalytical B. V. All Rights Reserved, 2016). Como o resíduo não era totalmente desconhecido foi utilizada uma varredura menor de 20 a 90 graus com passo de 0,02 ou seja uma leitura a cada 0,02 graus. O tempo de análise foi de 29 minutos e 15 segundos.

Figura 19 - Difratorômetro de raios X



Fonte: Autor

3.1.4 Periculosidade

A fim de avaliar o grau de periculosidade do material foram realizados testes de Classificação do Resíduo conforme as Normas ABNT/NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), NBR 10005 (ABNT, 2004b), NBR 10006 (ABNT, 2004d) pela indústria em

estudo de caso, no laboratório TASQA® Serviços Analíticos Ltda., Paulínia, SP, em 05/03/2015.

3.2 Análise da Areia Comum

A areia comum, extraída do Rio Sapucaí, foi adquirida no comércio local submetida aos seguintes testes:

3.2.1 Granulometria

Foi realizado o ensaio da distribuição granulométrica da areia comum usando a sequência de peneiras conforme a norma NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003) para agregados no laboratório de Geotecnia da UNIFEI.

3.2.2 Massa Específica

Para determinar a massa específica do material, foram coletadas duas amostras de 500 g da areia nas condições naturais de umidade (Figura 20a), do modo a serem utilizados no concreto. Desta forma, seguiu-se o procedimento da Norma NM 52/2009 (ABNT, 2009) utilizando o Picnômetro, conforme figura 20b, realizado no laboratório de Materiais de Construção Civil da FEPI.

Figura 20 - Determinação da massa específica da areia a) Amostra da areia comum e b) Picnômetro para medida da massa específica da areia



(a)



(b)

Fonte: Autor

3.2.3 Massa unitária e volume de vazios

A determinação da massa unitária foi realizada no laboratório de Materiais de Construção da FEPI, seguindo o procedimento da norma para Agregados NBR NM 45 (ABNT, 2006), utilizando balança com resolução 50 g e haste de adensamento com 16 mm de diâmetro, 600 mm de comprimento e recipiente de latão cilíndrico com volume de 11,30 litros. Para cálculo da massa unitária utilizou-se o método “A” da norma para agregados com dimensão máxima menor ou igual a 37,5 mm.

3.3 Análise da Brita

A brita de origem granítica extraída da região do sul de Minas, obtida no comércio local.

3.3.1 Granulometria

Foram pesadas duas amostras de 5 kg da brita e colocadas na sequência de peneiras de malhas # 31,5 mm; 25 mm; 19 mm; 12,5 mm; 6,3 mm; 4,75 mm e fundo, acoplados ao agitador mecânico Produtest® (Figura 21) com base na NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003).

Figura 21 - Sequência de peneiras para determinação da granulometria da brita



Fonte: Autor

3.3.2 Massa Específica

A Massa Específica da brita foi determinada seguindo os procedimentos da norma NBR NM 53/2009 (ABNT, 2009c). Foi colocado pouco mais 3 kg da amostra imerso em água por aproximadamente 24 h; em seguida, a brita foi enxugada superficialmente com pano e foi imediatamente pesada a quantidade de 3,0 kg, obtendo a massa saturada superfície seca. Depois pesado em um recipiente submerso e levado em estufa a 105° C por 24 h e feito a medição do agregado seco.

Para os procedimentos de pesagens foi utilizado balança Filizola® BP 15 (Figura 22).

Figura 22 - Determinação da massa específica da brita com balança hidrostática



Fonte: Autor

3.3.3 Massa unitária solta

A determinação da massa unitária foi realizada no laboratório de Materiais de Construção da FEPI, seguindo o procedimento da norma para Agregados NM 45/2006 (ABNT, 2006), utilizando balança com resolução 50 g e haste de adensamento com 16 mm de diâmetro, 600 mm de comprimento e recipiente de latão cilíndrico com volume de 11,30 litros (Figura 23). Para cálculo da massa unitária utilizou-se o método “A” da norma para agregados com dimensão máxima menor ou igual a 37,5 mm.

Figura 23 - Determinação da massa unitária solta da brita



Fonte: Autor

3.4 Análise do concreto com adição do Pó de Exaustão

As análises do concreto nos estados fresco e endurecido foram feitas conforme se segue:

- ✓ No estado fresco foi feito *Slump test* para determinar a consistência do concreto pelo ensaio de abatimento; NBR NM 67/1998 (ABNT, 1998); Laboratório de Estruturas da UNIFEI.
- ✓ No estado endurecido foram analisadas resistência à compressão axial e tração por compressão diametral, para avaliar a influência do processo na resistência mecânica dos materiais; NBR 5738/2003 - Procedimentos e moldagem de Corpos de Prova (ABNT, 2003); NBR 5739/2007 - Ensaio de compressão (ABNT, 2007); Ensaio de tração por compressão diametral NBR 7222/2010 (ABNT, 2010) e Absorção por imersão. Este último visando a analisar a absorção de água por imersão e índice de vazios - NBR 9778/2005 (ABNT, 2005). Foi realizado no Laboratório de Estruturas da UNIFEI.
- ✓ A fim de atender as exigências da Deliberação Normativa COPAM nº 196/2014 (MINAS GERAIS/COPAM, 2014), foram utilizados os resultados das análises químicas do extrato lixiviado e solubilizado do concreto endurecido de acordo

com os procedimentos das normas ABNT NBR 10005 (ABNT 2004b) e NBR 10006 (ABNT 2004c) conforme norma e parâmetros da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a) no Laboratório EP Engenharia do Processo LTDA em Guarulhos, SP.

- ✓ MEV EDS - Para a quantificação dos elementos químicos presentes na amostra foi utilizada Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), aparelho marca Zeiss® Modelo EVO MA-15 no Laboratório de Caracterização Estrutural da UNIFEI.

3.4.1 Dosagem do Concreto

Para cálculo da dosagem do concreto (APENDICE B) foram considerados que a aplicação seria em ambiente urbano, concreto com resistência mínima de 25 MPa, cimento CP V ARI (ANEXO A), método de dosagem ABCP (traço em massa).

Os traços para as misturas doravante denominadas M0, M10, M20, M30, M40, M50 e M100 são correspondentes respectivamente, a M0 o Controle, (sem adição de Pó de exaustão), e as misturas com 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 100% de Pó de Exaustão (Tabela 6).

Tabela 6 - Traço das misturas de concreto e massas dos componentes

Mistura	Traço	Cimento Kg	Areia Kg	Pó de Exaustão Kg	Brita Kg	Água L
M0	1:1,71:2,164:0,55	14,410	24,630	-	31,130	7,920
M10	1:1,554:0,173:2,164:0,55	14,410	22,400	2,490	31,130	7,920
M20	1:1,393:0,348:2,164:0,55	14,410	20,720	5,015	31,130	7,920
M30	1:1,230:0,527:2,164:0,55	14,410	17,720	7,590	31,130	7,920
M40	1:1,064:0,709:2,164:0,55	14,410	15,332	10,217	31,130	7,920
M50	1:0,895:0,895:2,164:0,55	14,410	12,897	12,897	31,130	7,920
M100	1:1,877:2,164:0,55	14,410	-	27,047	31,130	7,920

Fonte: Autor

Para confecção das misturas, utilizou-se das instalações do laboratório de estruturas da UNIFEI (Figura 24), por meio do uso da betoneira de 145 l da marca

CSM®. Foram confeccionados 20 corpos de prova para cada mistura, utilizando cilindros metálicos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura untados com óleo mineral. As datas de confecção das misturas variaram devido ao número de moldes disponíveis no laboratório, e desmoldagem e rompimentos que não podiam ser feitos em feriados e finais de semana.

Figura 24 - Vista geral do Laboratório de Estruturas da UNIFEI



Fonte: Autor

3.4.2 Abatimento

A trabalhabilidade e consistência da mistura foram avaliadas utilizando o método de abatimento do tronco de cone (*Slump test*), com utilização do cone metálico e haste de adensamento de 600 mm (Figura 25).

Figura 25 - Determinação do abatimento de concreto com tronco de cone metálico



Fonte: Autor

3.4.3 Moldagem dos Cps

Para moldagem dos Cps, foi feito o adensamento vibratório com Vibrador portátil CSM® de 110 V e mangote de 1,3 m e ponteira de 25 mm (Figuras 26a e 26b).

Figura 26 - a) Vibrador portátil e mangote, b) Corpos de prova moldados em moldes cilíndricos



(a)



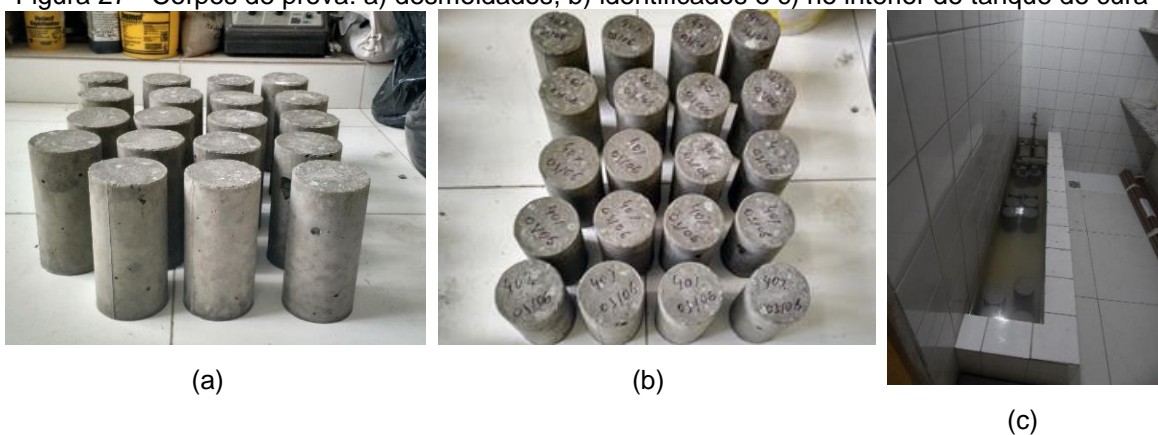
(b)

Fonte: Autor

3.4.4 Desmoldagem, identificação e cura dos Cps

As desformas foram feitas com um dia (24 h) a contar da hora que se inicia a hidratação do cimento. Após serem identificados, os Cps foram levados para o tanque de cura com água e cal permanecendo até os dias de rompimentos (Figuras 27a, 27b e 27c).

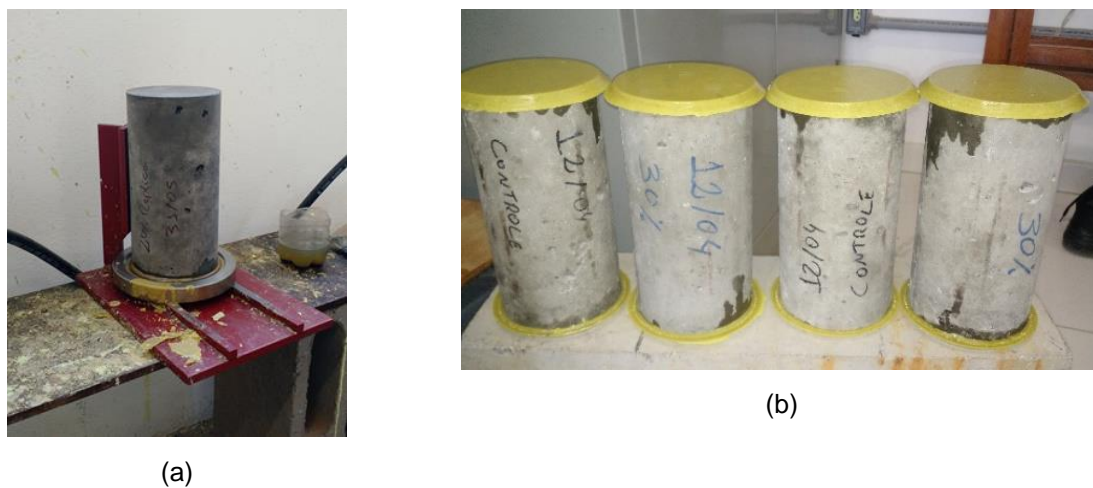
Figura 27 - Corpos de prova: a) desmoldados, b) identificados e c) no interior do tanque de cura



Fonte: Autor

Os Cps foram preparados com capeamento de enxofre para melhorar a distribuição de cargas no ensaio de compressão axial como nas figuras 28a e 28b.

Figura 28 - a) Molde metálico para capeamento e b) Cps capeados com enxofre



Fonte: Autor

3.4.5 Resistência Mecânica

Para avaliar as resistências mecânicas das misturas utilizou-se a máquina Time Testing Machines® WAW-1000 C (Figura 29). As velocidades utilizadas para ensaios de compressão axial e diametral foram respectivamente de 0,55 MPa/seg. 0,05 MPa/seg. A máquina está vinculada ao software *SmartTest* (TIME Group inc, 2000) que fornece os resultados das tensões até o rompimento e o gráfico Tensão *versus* Deformação.

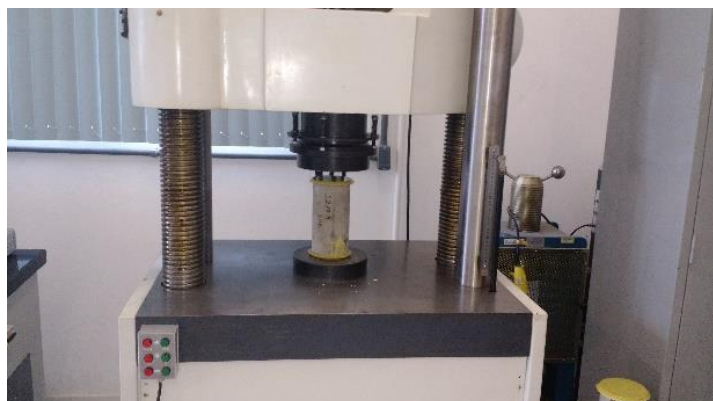
Figura 29 - Vista da máquina Time Testing Machines® WAW-1000 C



Fonte: Autor

Os rompimentos foram feitos aos 7 e 28 dias para resistência à compressão axial (Figuras 30a e 30b) e diametral (Figuras 31a e 31b).

Figura 30 - a) Teste de compressão axial, b) rompimento axial



(a)



(b)

Fonte: Autor

Figura 31 - a) Teste de compressão diametral, b) rompimento diametral



(a)



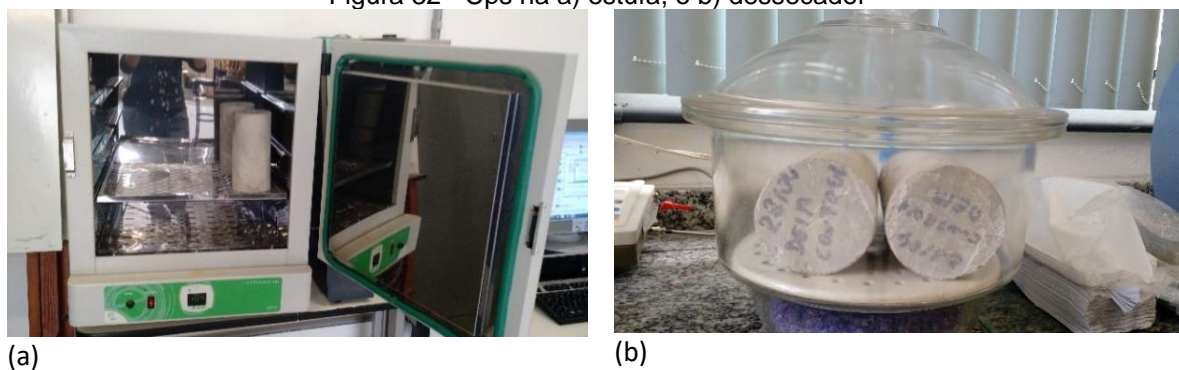
(b)

Fonte: Autor

3.4.6 Absorção em água e Índice de vazios

As análises de absorção em água, para avaliar o número de vazios e densidades das misturas, foram realizadas aos 35 dias com 2 Cps. Os Cps foram levados à estufa 105°C por 72 h (Figura 32a) e depois resfriados no dessecador (Figura 32b) e pesados. Em seguida foram imersos em água por 72 h.

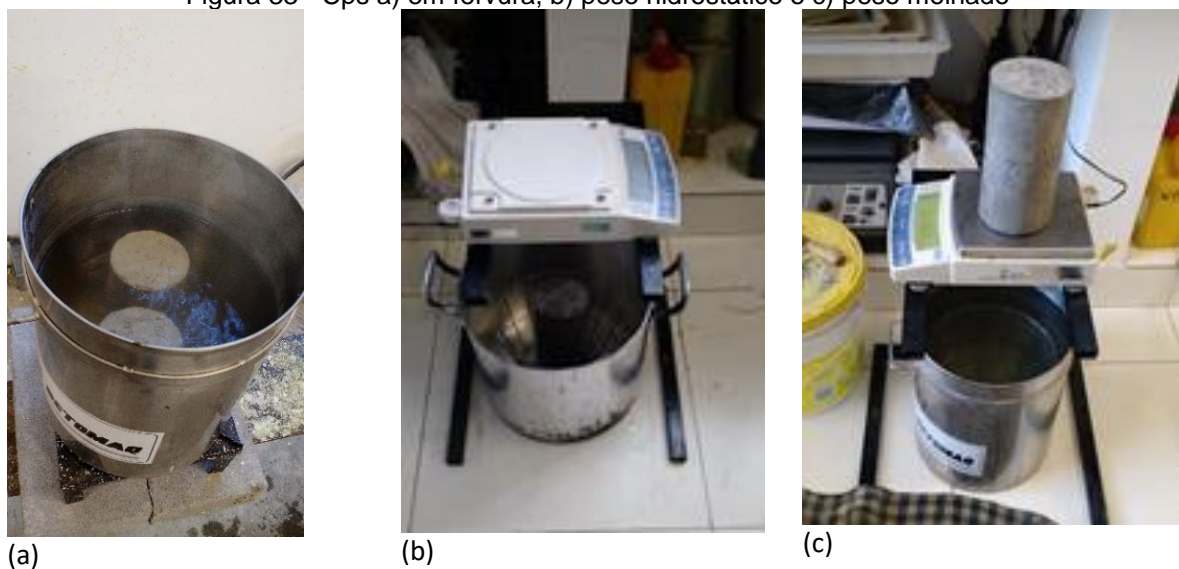
Figura 32 - Cps na a) estufa, e b) dessecador



Fonte: Autor

Após serem imersos por 72h foram colocados em recipiente metálico e levados à fervura por 5 h (Figura 33a). Pesados em balança hidrostática (Figura 33b) e retirado o excesso de água foram pesados molhados (Figura 33c).

Figura 33 - Cps a) em fervura, b) peso hidrostático e c) peso molhado



Fonte: Autor

3.4.7 MEV EDS

A análise por EDS é uma ferramenta muito importante do MEV para caracterização de materiais pois ajuda a identificar a composição química de partículas, regiões ou pontos de interesse da amostra. No presente estudo foram

analisadas as amostras de concreto com 0% (controle) e 50% do Pó de Exaustão. Foi utilizado o aparelho marca Zeiss® Modelo EVO MA-15, tensão de aceleração de 15Kv. Realizado no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal de Itajubá

3.4.8 Periculosidade

A Periculosidade da mistura endurecida foi avaliada pelas análises do extrato lixiviado e solubilizado do concreto endurecido de acordo com os procedimentos das normas ABNT NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2006c); Norma e parâmetros da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a) realizados no Laboratório EP Engenharia do Processo LTDA em Guarulhos, SP. Foi enviado 2 kg do concreto endurecido contendo 50% do Pó de exaustão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises dos Agregados Miúdos

4.1.1 Granulometria do Pó de Exaustão e da Areia Comum

A distribuição granulométrica do resíduo Pó de Exaustão de ADF e da Areia Comum estão demonstradas na Tabela 7.

Tabela 7- Distribuição Granulométrica do Pó de Exaustão e Areia

PENEIRAS	% Retida Acumulada	% Acumulada
# mm	Pó de Exaustão	Areia Comum
4,75	0,0	0
2,36	0,0	1,12
1,18	0,0	6,96
0,6	0,014	28,02
0,3	0,394	61,29
0,15	50,591	90,21
0,075	93,486	100,00
< 0,075	100,000	
Dimensão Máxima	0,3	2,4
Modulo de Finura	0,51	1,88
Graduação	Muito fina	Fina
Massa Específica	2,61 g/cm ³	2,42 g/cm ³

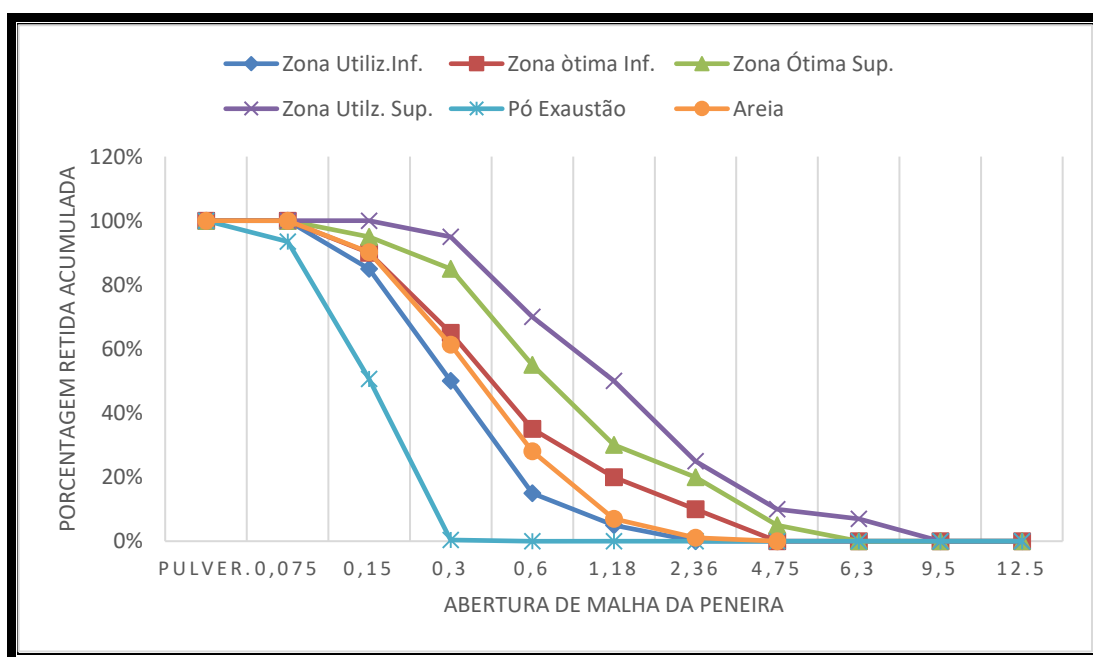
Observa-se que o resíduo, Pó de Exaustão, apresenta baixa granulometria e, maior percentagem abaixo de 0,3 mm. O módulo de finura foi determinado pela Equação 2 e a dimensão máxima calculada é 0,3 mm.

$$MF = \sum \% \text{ Acum. } (\leq \# 0,15) / 100 = 50,999 / 100 = 0,51 \quad (2)$$

Pela distribuição granulométrica da areia apresentada na Tabela 7, observa-se a dimensão máxima 2,4 mm e Modulo de finura 1,88. A NBR 7211/2005 classifica o Pó de Exaustão como muito fino e a areia como fina.

A distribuição granulométrica do Pó de Exaustão ficou abaixo do limite inferior da zona utilizável para aplicação em concreto; como identificado na Figura 34. Porém, deve ser feito estudo na dosagem para sua aplicabilidade em concreto. Este resultado também foi encontrado por Watanabe (2004). Importante observar que a distribuição granulométrica foi contínua e isso reduz a permeabilidade do concreto.

Figura 34 - Curva granulométrica do pó de Exaustão e da areia comum



Fonte: Autor

A análise do resíduo em estudo, realizada pela sequência de peneiras apresentou 50,59% entre 0,6 e 0,15 mm e 49,41% inferior a 0,15 mm. Ainda, é possível notar que 6,51% material que passa na peneira de malha 0,075 mm é considerado pela norma ABNT NBR 7211/2005 (ABNT, 2005) como material Pulverulento. Sendo a porcentagem máxima de 5% em massa admitida para concreto.

No entanto a massa total do agregado miúdo considera a areia comum então este valor não ultrapassou os 5%.

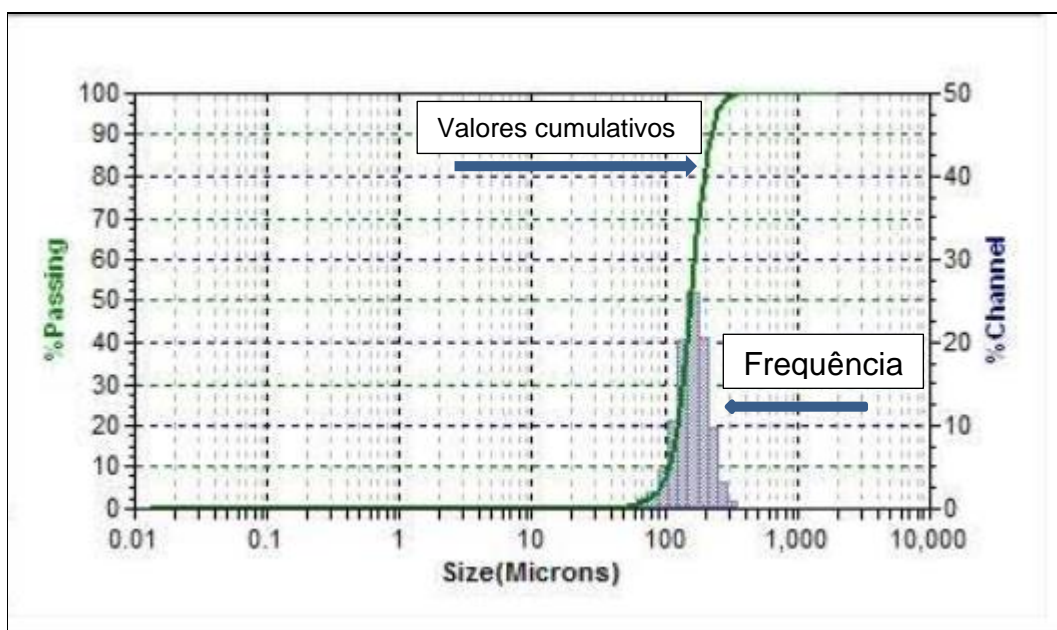
Visto que as partículas são muito pequenas, decidiu-se realizar análise por difração a laser. A tabela 8 apresenta o resumo da distribuição do tamanho das partículas do resíduo pó de exaustão por difração a laser. Observa-se que o resíduo apresentou baixa granulometria, 90% abaixo de 0,22 mm.

Tabela 8 - Distribuição do tamanho da partícula do Pó de Exaustão

Distribuição do tamanho das partículas	Tamanho (μm)
10% das partículas abaixo de	108,0
50% das partículas abaixo de	158,7
90% das partículas abaixo de	220,4
95% das partículas abaixo de	242,9
100% das partículas abaixo de	352,0

A curva granulométrica do resíduo determinada pelo Granulômetro a laser está representada na figura 35.

Figura 35 - Curva granulométrica do Pó de Exaustão gerada no granulômetro a laser



Observa-se no gráfico da Figura 36, que a curva de Gauss representa partículas entre 352,0 μm e 52,32 μm , sendo o valor médio próximo de 170 μm . Os retângulos justapostos representam a frequência de partículas com a mesma granulometria.

Pode-se fazer uma comparação com os resultados obtidos da distribuição granulométrica pela sequência de peneiras e difração a laser, por meio dos valores da Tabela 9 gerada no Granulômetro a laser. Observa-se que houve uma diferença nas porcentagens de massa retidas/acumuladas, pelos dois métodos; porém, a distribuição ocorreu nas mesmas faixas de tamanho.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica a laser

Tamanho (μm)	% Retida	% Passante	% Retida Acumulada	# Peneira mm
418,6	0,00	100,0	0,00	
352,0	0,86	100,0	0,86	
296,0	3,20	99,14	4,06	~ 0,30
248,9	9,81	95,94	13,87	
209,3	20,47	86,13	34,34	
176,0	26,12	65,66	60,46	
148,0	20,33	39,54	80,79	~0,15
124,4	10,61	19,21	91,40	
104,6	4,54	8,60	95,94	
87,99	1,99	4,06	97,93	
73,99	1,03	2,07	98,96	< 0,075
62,22	0,63	1,04	99,59	
52,32	0,41	0,41	100,00	
44,00	0,00	0,00	100,00	

Santos; Dalla Valentina; Souza (2015) analisaram o Pó de Exaustão por difração a laser e observaram que o resíduo apresentou baixa granulometria com maior porcentagem abaixo de 0,088 mm.

4.1.2 Massa Específica e Massa Unitária Solta

A massa específica do Pó de Exaustão foi determinada conforme Norma NM 52/2009 (ABNT, 2009) o resultado obtido foi $\rho = 2,61 \text{ g/cm}^3$. Para comparação também foi realizado o teste pelo método EMBRAPA (PAULA; DUARTE, 1997) e obteve-se o resultado da massa específica $2,56 \text{ g/cm}^3$. Os valores encontrados estão dentro dos limites especificados por Monosi; Sani; Tittarelli, (2010) que afirmam que a densidade pode variar entre 2,20 a $2,60 \text{ g/cm}^3$ e Javed e Lovel (1994) entre 2,39 a $2,79 \text{ g/cm}^3$. A massa unitária solta do Pó de Exaustão foi determinada $1,42 \text{ g/cm}^3$ ($1418,17 \text{ kg/m}^3$).

A massa específica da areia comum foi determinada $2,42 \text{ g/cm}^3$ e a massa unitária solta $1,49 \text{ g/cm}^3$ ($1493,55 \text{ kg/m}^3$). Em média, a Massa Específica da areia comum é $2,6 \text{ g/cm}^3$ e Massa Unitária Solta é $1,4 \text{ g/cm}^3$ (FREITAS JR., 2013).

4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As figuras 36 e 37 representam as imagens referentes à micrografia do resíduo. As partículas apresentam certa homogeneidade com morfologia arredondada. Monosi, Sani e Tittarelli (2010) afirmaram que as partículas de ADF geralmente apresentam morfologia de subangular para arredondada. Conforme Salomão (2010), confirma-se que as partículas são subangulares, ou seja, mistura de faces planas e arredondadas com poucas arestas e ângulos suavizados. Esta classificação também encontrada por Santos *et al.* (2005). Quanto ao tamanho, na figura 37, apresentaram variação entre $40 \mu\text{m}$ e $300 \mu\text{m}$.

Figura 36 - MEV por Elétron Secundário (SE) com aumento de 100x

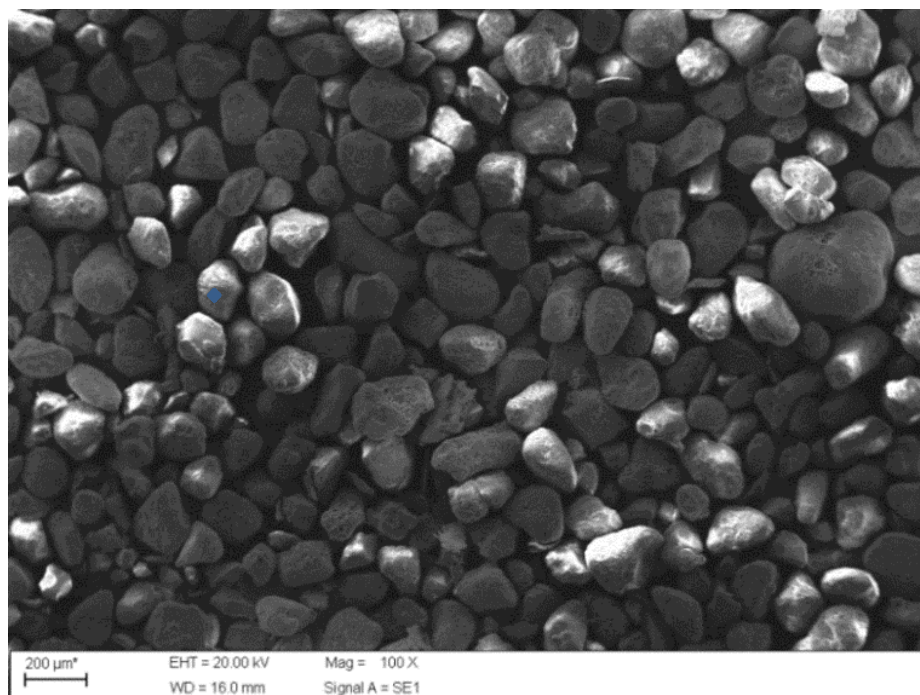
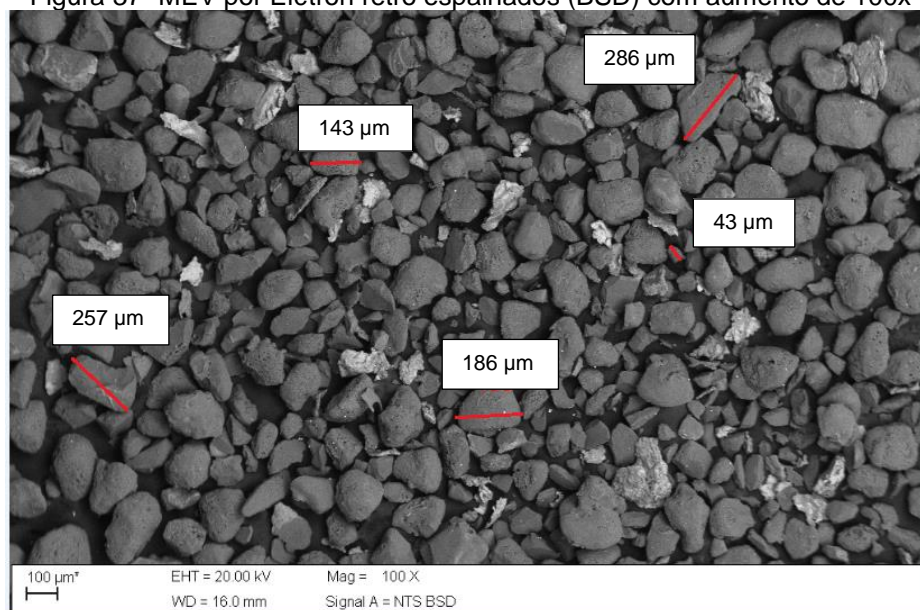
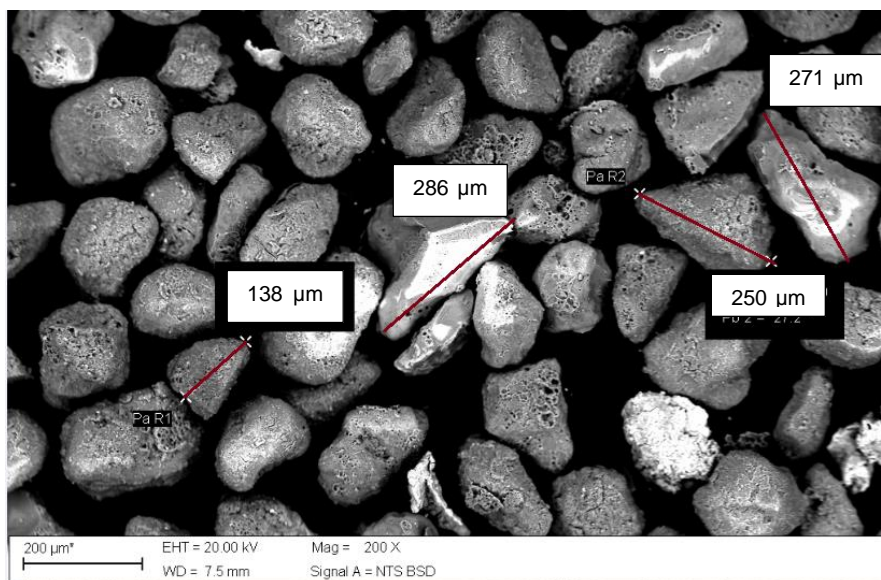


Figura 37- MEV por Elétron retro espalhados (BSD) com aumento de 100x



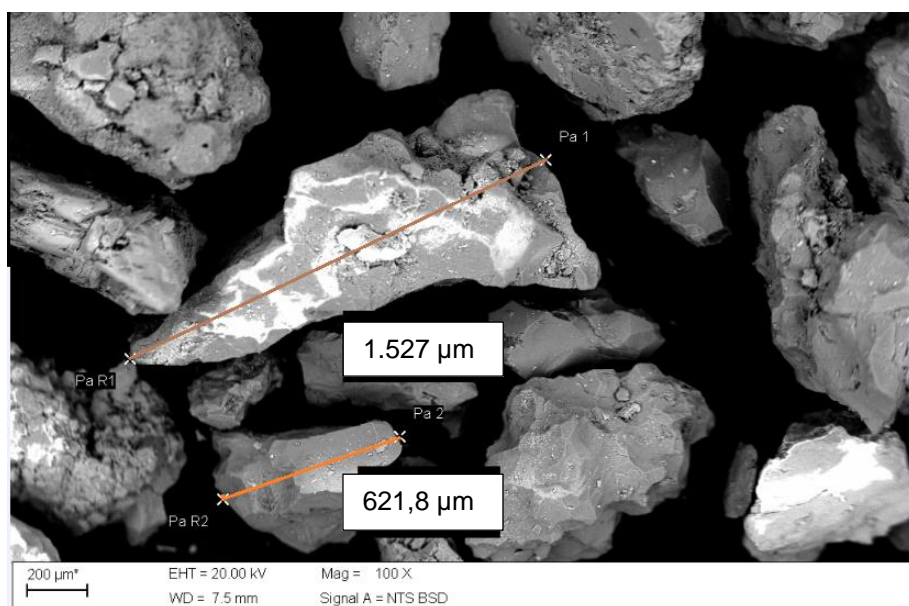
Pode-se observar na Figura 38 que as partículas em geral, com tamanhos da ordem micrométrica (μm), possuem dimensões máximas de cerca de 350 μm .

Figura 38 - MEV por Elétron retro espalhados (BSD) com aumento de 200x



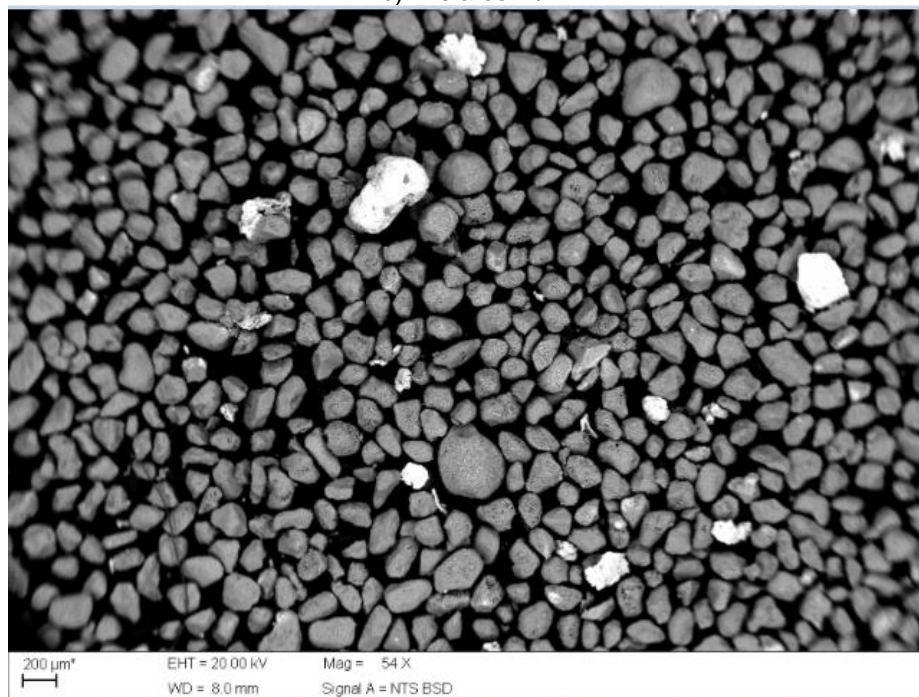
As partículas de areia comum são irregulares, ou angulares segundo a classificação de Salomão (2010), com dimensões, em maiores porcentagens, superiores a 0,30 mm ou 300 μm (Figura 39).

Figura 39 - MEV por Elétron retro espalhados (BSD) com aumento de 100x

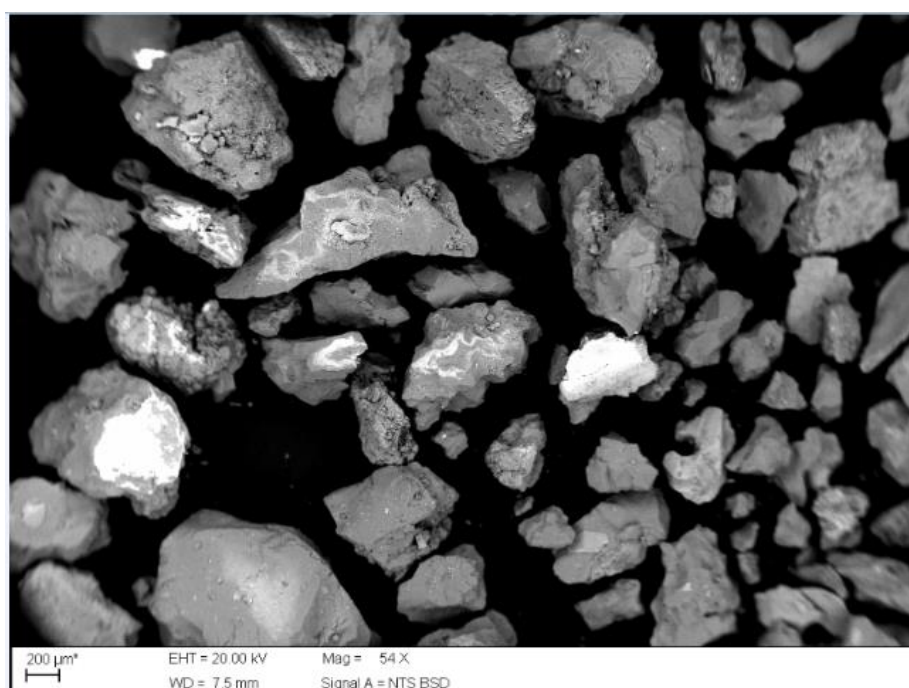


Pode-se comparar as formas e dimensões do resíduo Pó de Exaustão (Figura 40a) e da Areia comum (Figura 40b). As partículas do Pó de Exaustão são mais arredondadas, com menores espaços vazios entre elas. A dimensão máxima do Pó de Exaustão foi determinada 0,3 mm e da areia 2,4 mm.

Figura 40 - MEV por Elétron retro espalhados ambos com aumento de 54x; a) Pó de Exaustão e b) Areia comum



(a)

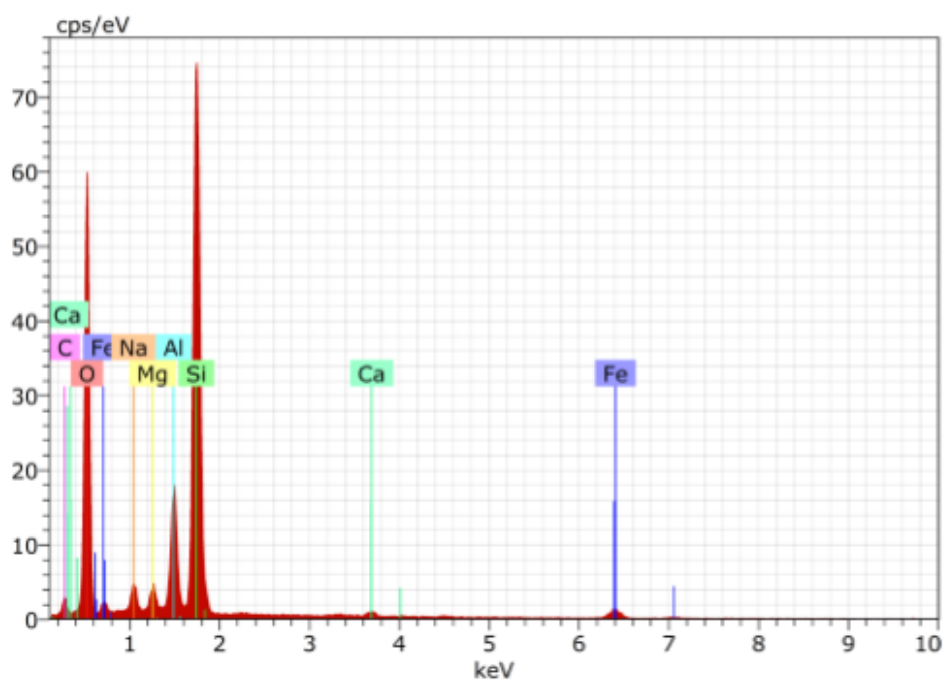


(b)

4.1.4 MEV EDS do Pó de Exaustão

Para a identificação dos elementos químicos presentes na amostra foi utilizada Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS). Esta análise gera o espectro com elementos identificados e tabela com porcentagens em peso (Figura 41).

Figura 41 - MEV EDS - Espectro obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados.



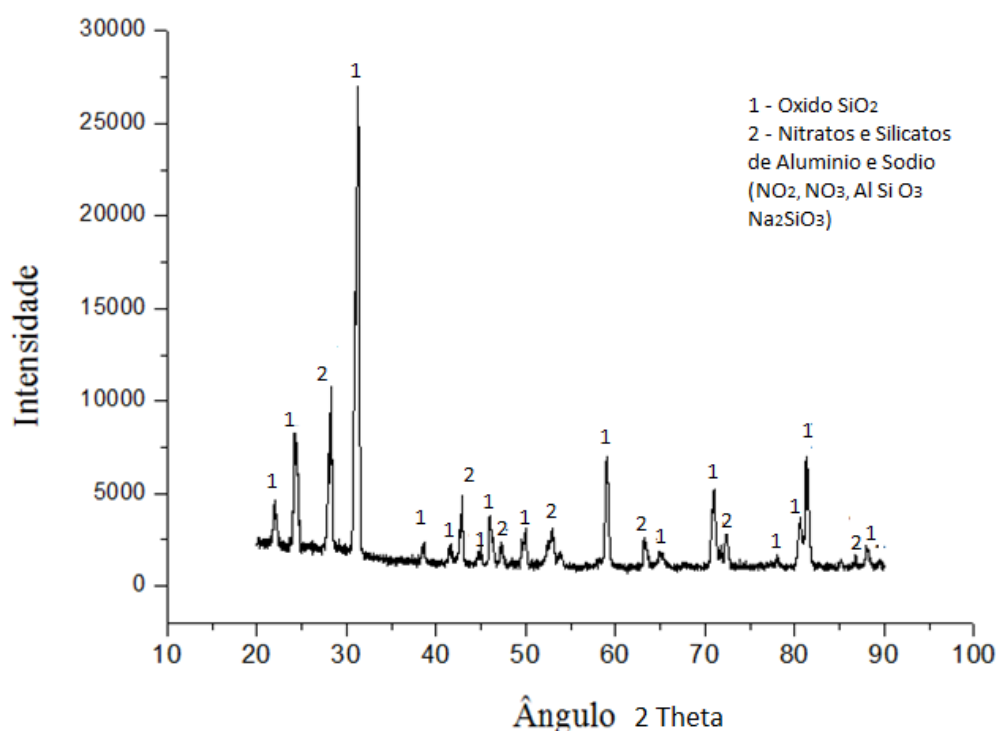
Elemento	Número Atômico	Peso normalizado % Peso
O	8	55,77
Si	14	22,45
C	6	9,06
Al	13	5,99
Na	11	2,52
Fe	26	2,21
Mg	12	2,02
Ca	20	0,50
Total		100,00

Os elementos identificados são o Silício (Si) proveniente da areia de quartzo, na forma de Silicato de Alumínio (Al), Magnésio (Mg) e Cálcio (Ca) presentes na argila de bentonita. Carbono e Oxigênio do carvão e Ferro (Fe), do processo de fundição. Quanto as quantidades, não se pode afirmar com exatidão pois os dados dos elementos de baixo peso atômico como Oxigênio e Carbono são imprecisos por este método influenciando a quantificação dos outros elementos.

4.1.5 Difração de raios X (DRX) do Pó de Exaustão

A composição mineralógica do resíduo pó de exaustão foi analisada por difração de raios-X conforme apresentado na figura 42, na qual se verificou a presença predominante de sílica (SiO_2), na forma de quartzo na fase cristalina. Como foi demonstrado por Santos *et al.* (2015), Barros *et al.* (2013) e Toledo (2006). Também foram identificados Nitratos, Silicatos de Alumínio e Oxido de Ferro provenientes da bentonita.

Figura 42 - Análise de fases por Difratoograma (DRX) do Pó de Exaustão



A maior quantidade de Sílica (SiO₂) foi observada em razão da matéria prima da areia a verde utilizada para moldagem dos fundidos.

4.1.6 Periculosidade do Pó de Exaustão

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram feitos nas amostras da Rebarbação e Sistema Areia, separadamente, como mostram os resultados nas Tabelas 10 e 11, fornecidos pela indústria em estudo.

➤ Extrato. Lixiviado

A tabela 10 apresenta a concentração, no extrato lixiviado, de alguns elementos químicos encontrados no resíduo os quais foram comparados com os limites máximos permitidos pela norma de classificação de resíduos, NBR 10004:2004 (ABNT, 2004) e valores máximos COPAM/MG.

Tabela 10 - Concentração – Limite máximo no extrato lixiviado do Resíduo

Parâmetro	Unidade	Resultados		Limite máximo ABNT mg/L	Valores Máximos COPAM *
		Analíticos			
		Rebarbação	Sistema Areia		
Arsênio	mg/L	< 0,05	< 0,05	1	0,50
Bário	mg/L	0,22	0,75	70	10,0
Cádmio	mg/L	< 0,005	< 0,005	0,5	0,10
Chumbo	mg/L	< 0,028	< 0,028	5	0,50
Cromo total	mg/L	< 0,005	< 0,005	1	0,50
Fluoretos	mg/L	0,13	0,13	150	-
Mercúrio	mg/L	< 0,00017	< 0,00017	0,1	0,02
Selênio	mg/L	< 0,005	< 0,005	1	0,10
Orgânicos	mg/L	< LQ	< LQ	Anexo F	

Fonte: Adaptado de Koenig; Santos; Secomandi, 2015 a e b

(*) Extrato lixiviado obtido conforme a norma da ABNT NBR 10.005 (ABNT, 2004b).

Os parâmetros analisados apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo F da Norma ABNT NBR 10004/2004 e, portanto, tanto o resíduo proveniente da rebarbação quanto o proveniente do sistema areia foram classificados como Não Perigoso.

➤ Extrato Solubilizado

Alguns elementos solubilizados em água estão indicados na Tabela 11 e foram comparados os limites máximos estabelecidos pela ABNT 10004/2004.

Parâmetro	Unidade	Resultados Analíticos		Limite máximo ABNT mg/L	Valores Máximos COPAM **
		Rebarbação	Sistema Areia		
Alumínio	mg/L	1,10	16,4	0,2	
Arsênio	mg/L	<0,001	0,006	0,01	
Bário	mg/L	3,94	0,25	0,7	
Cádmio	mg/L	<0,005	<0,005	0,005	
Chumbo	mg/L	<0,002	0,013	0,01	
Cianeto	mg/L	0,0064	0,0054	0,07	2,0
Cloretos	mg/L	11,5	40,3	250	2500,0
Cobre	mg/L	0,017	0,019	2	2,5
Cromo total	mg/L	0,0063	0,13	0,05	
Ferro	mg/L	1,42	10,9	0,32	15,0
Fluoretos	mg/L	0,61	0,79	1,5	14,0
Manganês	mg/L	0,031	0,47	0,1	0,5
Merúrio	mg/L	0,0002	< 0,00017	0,001	
Nitrato (como N)	mg/L	0,4	19,0	10	
Prata	mg/L	< 0,005	< 0,005	0,05	
Selênio	mg/L	< 0,002	< 0,002	0,01	
Sódio	mg/L	37,1	79,5	200	2500,0
Sulfato (SO ₄)	mg/L	14,3	101	250	2500,0
Surfactantes	mg/L	< 0,03	< 0,03	0,5	
Zinco	mg/L	0,065	0,021	5	25,0
Fenóis	mg/L	< 0,0011	< 0,0059	0,01	3,0

Tabela 11 - Concentração – Limite máximo Solubilizado do Resíduo

Parâmetro	Unidade	Resultados Analíticos		Limite máximo ABNT mg/L	Valores Máximos COPAM **
		Rebarbação	Sistema Areia		
Outros Orgânicos	mg/L	< LM	< LM	Anexo G	

Fonte: Adaptado de Koenig; Santos; Secomandi, 2015 a e b

(**) Extrato aquoso obtido conforme descrito na NBR 15702 de 2009.

Com relação ao resíduo proveniente da rebarbação, os parâmetros analisados Alumínio, Bário e Ferro apresentaram concentrações superiores às indicadas no Anexo G da Norma NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a); e com relação ao resíduo proveniente do sistema areia os parâmetros analisados Alumínio, Chumbo, Cromo Total, Ferro, Manganês e Nitrato apresentaram concentrações superiores o que indica que os resíduos foram classificados como Não Inertes

Baseado nos resultados obtidos, ambas amostras foram classificadas como Classe II A – Resíduo Não Perigoso e Não inerte.

➤ pH das amostras

A amostra obtida na rebarbação apresentou pH em água (1:1) 9,13 e a amostra obtida no Sistema Areia apresentou pH em água (1:1) 9,51. Jonhson (1981) relata que o pH da ADF varia de 4 a 12 e Guney et al (2010), nos seus experimentos com ADF também encontraram pH 9,1.

4.2 Análise da Brita

4.2.1 Granulometria

Por meio da distribuição granulométrica da brita (Tabela 12), pode-se concluir que se trata de agregado graúdo com dimensão máxima de 19 mm e módulo de finura 2,42. Dessa forma, a brita é classificada como brita 1.

Tabela 12 - Distribuição Granulométrica da Brita

PENEIRAS # mm	Peso Areia kg	% Retida	% Acumulada
31,5	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0
19	0,140	2,8	2,9
12,5	2,560	51,2	54,0
6,3	1,595	31,9	85,9
4,75	0,665	13,3	99,2
Fundo	0,040	0,8	100,0
Total	5,000	100,0	

4.3.2 Massa Específica e Massa Unitária Solta

A massa específica foi determinada como $2,74 \text{ g/cm}^3$ e a massa unitária solta como $1,39 \text{ g/cm}^3$. Absorção de 0,33%. Este resultado está de acordo com o relatado por Freitas Junior (2013), que encontrou para a brita massa específica de $2,7 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária solta de $1,5 \text{ g/cm}^3$.

4.4 Propriedades do Concreto com Pó de Exaustão

Os resultados das análises, do concreto endurecido, de compressão axial, módulo de elasticidade, compressão diametral e absorção por imersão em água encontram-se no APÊNDICE C.

4.4.1 Concreto Fresco: Abatimento

As misturas de concreto no estado fresco apresentaram na Tabela 13 os seguintes valores no ensaio de abatimento (*Slump*).

Mistura	Data de moldagem	7 dias	28 dias	Slump cm
M0	28/04/2016	04/05/2016	25/05/2016	6,5
M10	03/05/2016	10/05/2016	30/05/2016	9,5
M20	11/05/2016	17/05/2016	07/06/2016	10
M30	27/04/2015	03/05/2016	24/05/2016	8
M40	01/06/2016	07/06/2016	28/06/2016	9,5
M50	02/06/2016	08/06/2016	29/06/2016	10,5
M100	16/08/2016	-	12/09/2016	0

De acordo com a revisão, esperava-se que com o aumento do Pó de Exaustão, a amostra diminuiria o abatimento, ou seja, diminuiria a consistência apresentando uma amostra mais seca, com menor valor do *slump*; porém, foi utilizado um fator água/cimento alto e o aumento do valor do *slump* pode ser devido ao fato do resíduo possuir partículas mais arredondadas e isso ter melhorado a fluidez das misturas.

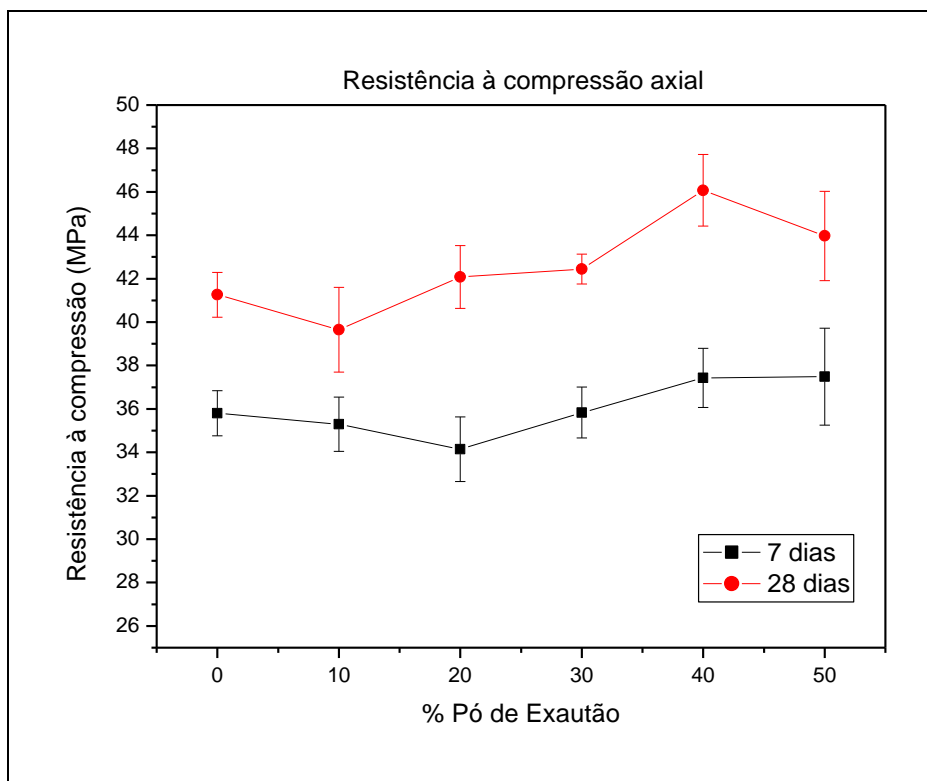
Alguns parâmetros podem ter influenciado nos resultados de abatimento das misturas como a temperatura ambiente, umidade do ar, paradas no funcionamento da betoneira devido as misturas terem aderido nas paredes do equipamento e com isso o tempo da betoneira não foi o mesmo para todas as misturas.

4.4.2 Resistência à Compressão Axial

As médias de Resistência à Compressão Axial estão representadas na Figura 43. Aos 28 dias, as amostras apresentaram um aumento de resistência à compressão com a adição do Pó de Exaustão em relação ao concreto controle (0%). A mistura com 40 % do resíduo apresentou maior resistência, e isto pode ser explicado que o Pó de Exaustão deixou a mistura mais densa e com melhor resistência a compressão.

Com 50 % de substituição, a mistura apresentou uma diminuição na resistência, mas ainda superior à mistura sem o resíduo.

Figura 43 - Gráfico de tensões por compressão axial nas misturas de concreto



Um decréscimo da resistência foi identificado na amostra com 10%. Comportamento semelhante ocorreu em Guney *et al*, 2010, que ao analisarem ADF em concreto de alta resistência, com 5% houve uma diminuição da resistência e depois um aumento com 10%. No entanto, verificando o desvio padrão, observou-se que as misturas com 0, 10%, 20%, 30% e 50% estão dentro dos desvios, então não se pode inferir que houve aumento ou diminuição de resistência nessas porcentagens. Conclui-se que houve um aumento real de resistência com 40%.

4.4.3 Módulo de Elasticidade Tangente

O Módulo de Elasticidade tangente, diretamente proporcional à resistência à compressão, é dado pela formula 1.

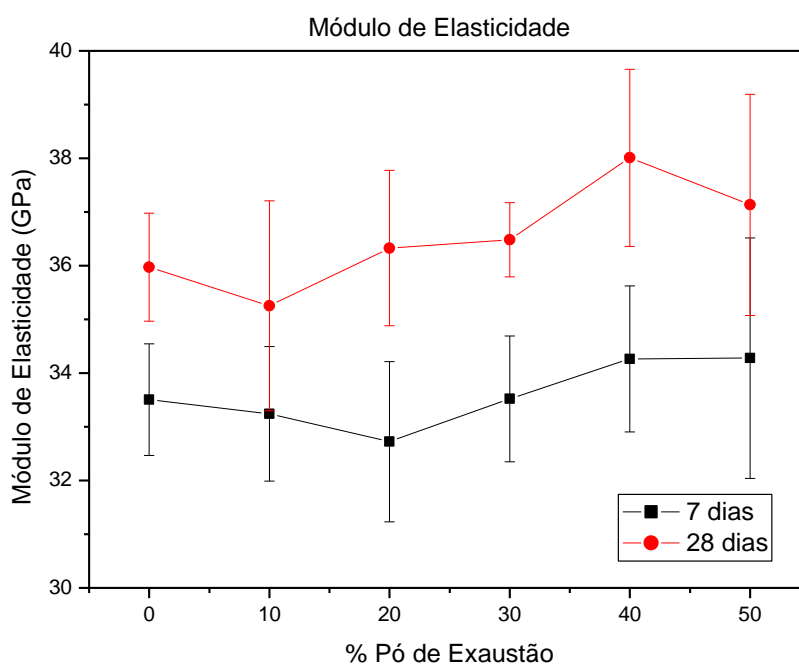
$$E_c = 5600 \cdot f_{cj}^{1/2} \quad (1)$$

E_c : Módulo de elasticidade tangente (GPa)

f_{cj} : Resistência a compressão em j dias (MPa)

Observa-se na figura 44 que as curvas do Módulo de Elasticidade tiveram o mesmo comportamento que as curvas do gráfico de Compressão Axial. Com 20%, 30% e 50% houve um pequeno aumento no valor do Módulo de Elasticidade em relação ao concreto controle. O maior valor, na mistura com 40% do pó de exaustão, foi de 38 GPa. Porém todos os resultados estão dentro do desvio padrão o que leva a concluir que a adição do pó de exaustão nestas porcentagens pode não influenciar muito no módulo de elasticidade.

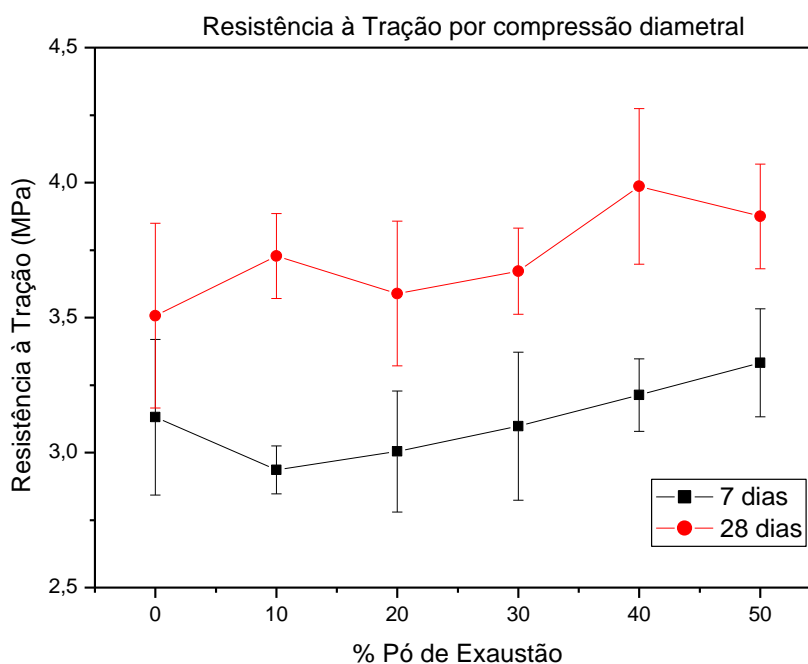
Figura 44 - Gráfico do Módulo de Elasticidade das misturas de concreto



4.4.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração foi avaliada por compressão diametral e os resultados representados na figura 45 mostram que em todas as porcentagens ocorreram aumento de resistência em relação ao concreto controle, sendo o melhor resultado com 40%.

Figura 45 - Gráfico de tensões por compressão diametral das misturas de concreto



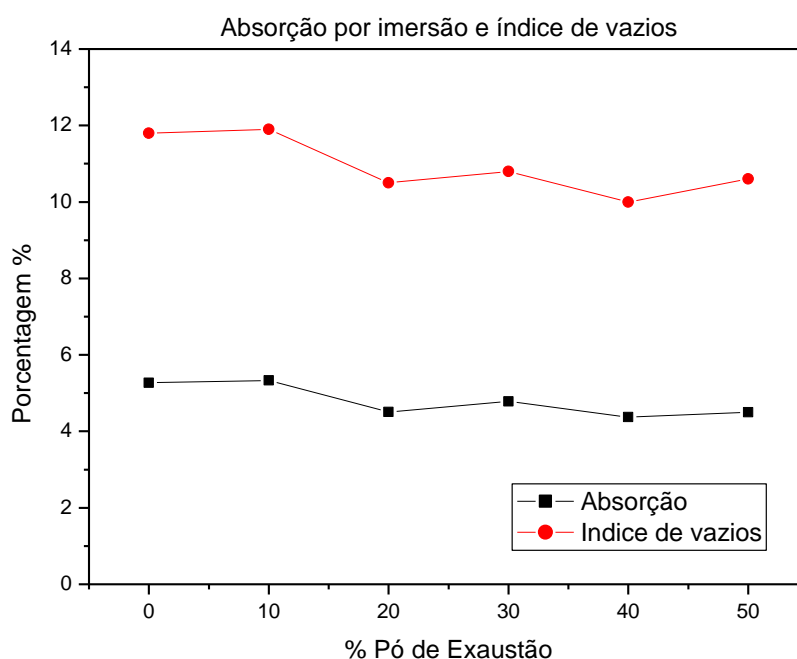
Os valores obtidos na resistência à tração por compressão diametral correspondem a 8 a 9% da resistência à compressão axial, sendo a média de 7 a 10% conforme Eftting (2014). Observa-se que todas as misturas estão dentro do desvio padrão. Conclui-se que não houve grande alteração nas resistências a tração com a adição do Pó de Exaustão.

Segundo os autores Siddique, Schutter e Noumowe (2009), grandes quantidades do resíduo podem prejudicar a aderência da pasta ao agregado devido a argila presente na areia a verde, reduzindo a resistência à tração.

4.4.5 Absorção de Água e Índice de Vazios

O gráfico da Figura 46 mostra que houve diminuição do índice de vazios e consequente diminuição da absorção de água com o aumento da porcentagem do resíduo. O índice de vazios do concreto varia entre 10 e 11% (EFFITING, 2014).

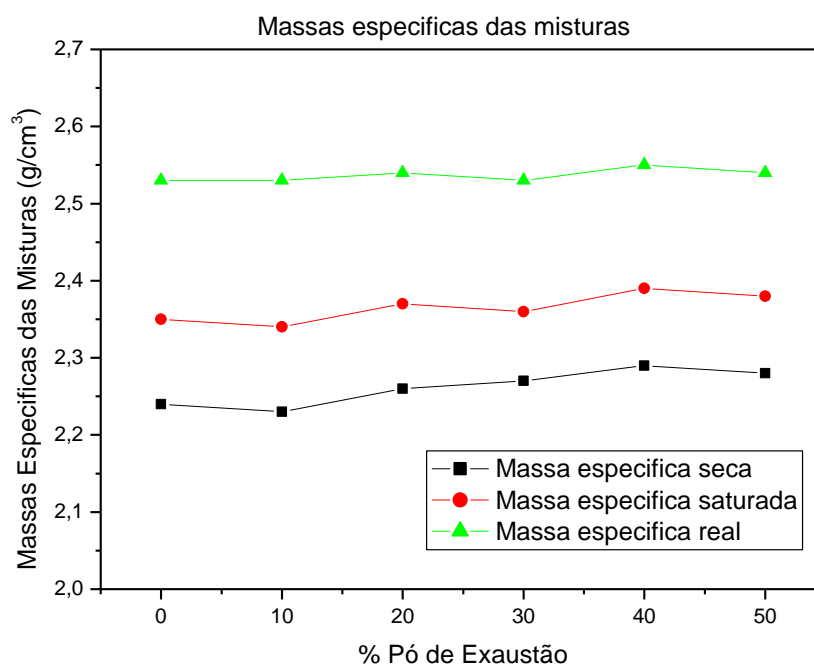
Figura 46 - Gráfico de absorção em água e índice de vazios das misturas



4.4.6 Massa Específica

Observa-se (Figura 47) também que houve melhora na massa específica da mistura com 40%, obtendo valor da massa específica real de 2,55 g/cm³. Os valores encontrados estão conforme valores preconizados por Effting (2014) e relatados na NBR 6118/2014 (ABNT, 2014).

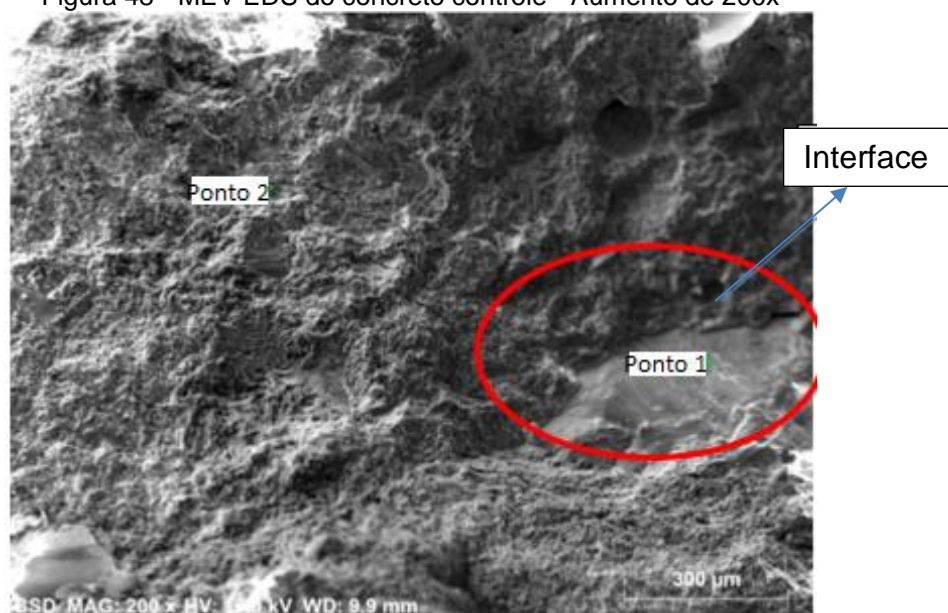
Figura 47 - Massas Específicas das misturas de concreto



4.4.7 MEV EDS do concreto controle (0%)

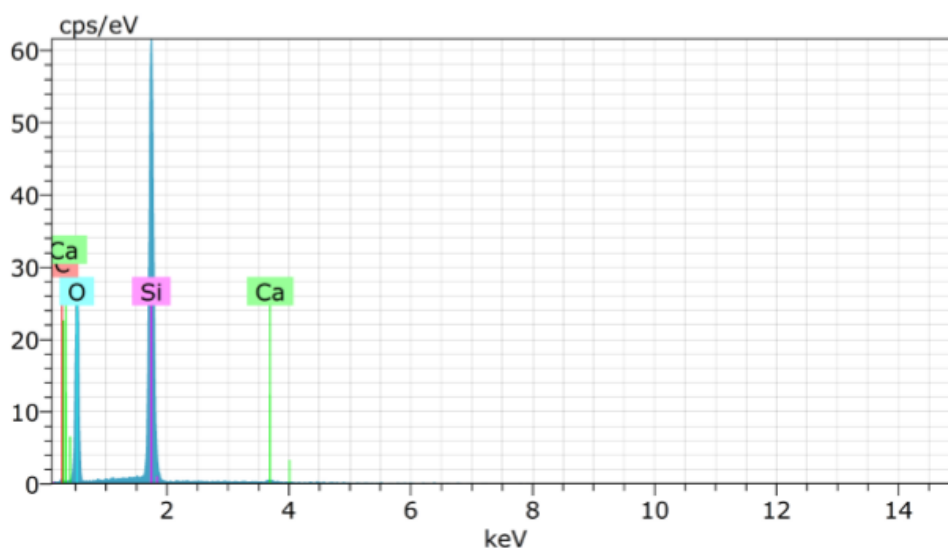
O concreto controle foi analisado por EDS e desta forma pode-se verificar os elementos químicos presentes na mistura (Figura 48).

Figura 48 - MEV EDS do concreto controle - Aumento de 200x



Os espectros de EDS no Ponto 1 (Figura 49) e Ponto 2 (Figura 50) mostram os elementos químicos presentes na mistura sem adição do resíduo em análise.

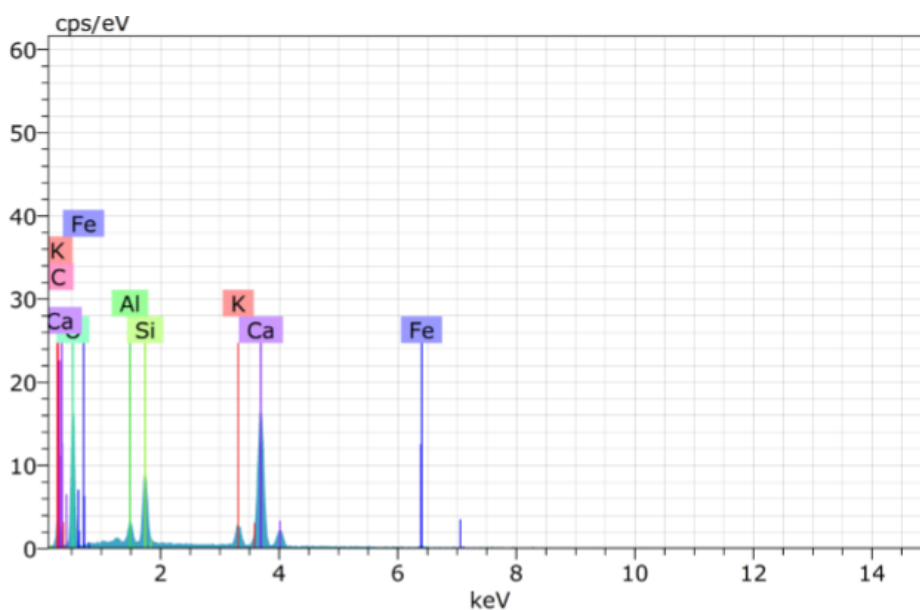
Figura 49 - MEV EDS Espectro obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados no ponto 1.



Elemento	Número Atômico	Peso normalizado % Peso
O	8	50,40
Si	14	45,82
C	6	3,27
Ca	20	0,45
Total		100,00

No entanto não se pode afirmar as quantidades, pois a leitura dos elementos de baixo peso atômico como Oxigênio e Carbono são imprecisas e estes resultados influenciam na quantificação total em peso de todos os elementos.

Figura 50 - MEV EDS Espectro obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados no ponto 2



Elemento	Número Atômico	Peso normalizado % Peso
O	8	50,25
Ca	20	28,84
C	6	10,08
Si	14	5,50
K	19	3,09
Al	13	1,68
Fe	26	0,56
Total		100,00

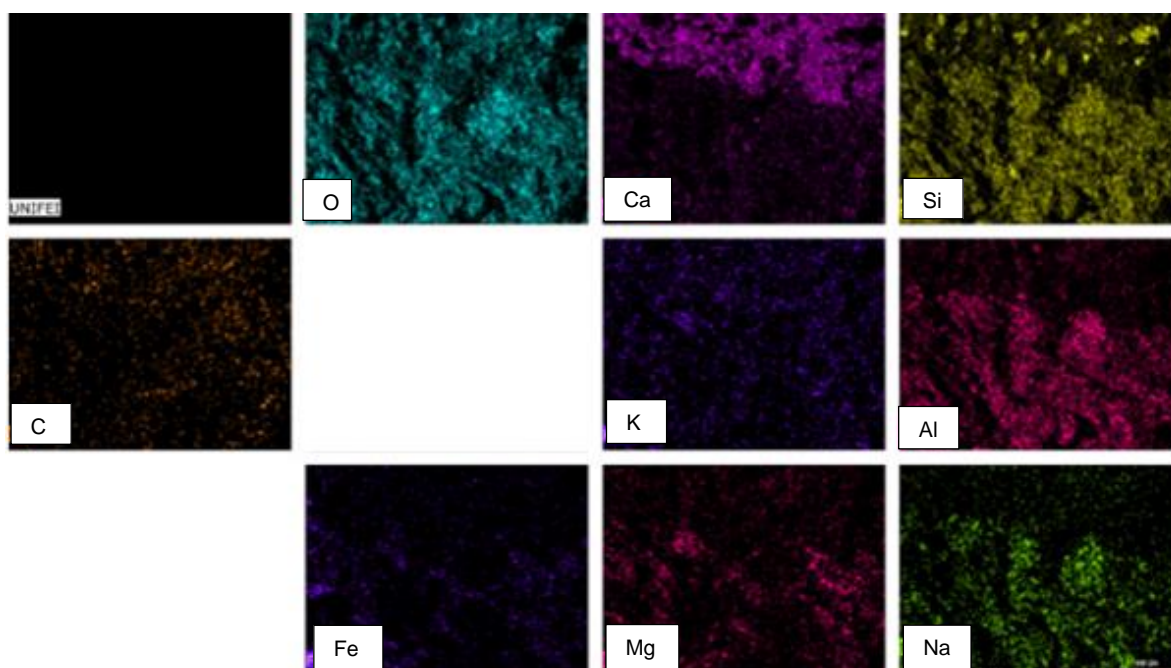
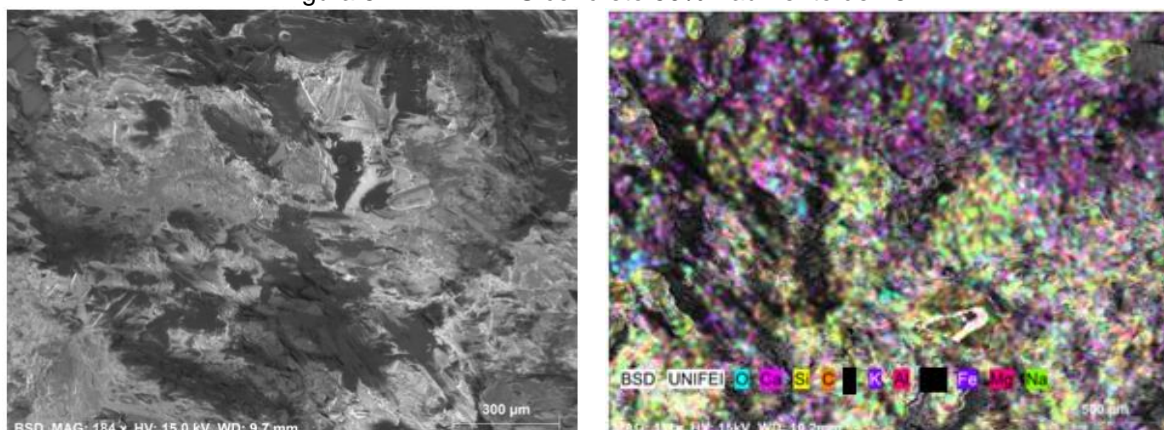
Analisando dois pontos da amostra do concreto com 0% do Pó de Exaustão, os elementos químicos encontrados foram Oxigênio (O) em maior quantidade, no entanto este valor não é preciso. No ponto 1 destaca-se o Silício (Si) o que demonstra ser a areia. No ponto 2, o Silício (Si), Cálcio (Ca), Carbono (C), Alumínio (Al) e Ferro (Fe) presentes no cimento na forma de Silicatos, Aluminatos e Ferro-Aluminatos; O Silício também na forma de óxidos provenientes da areia de quartzo.

4.4.8 MEV EDS do concreto com 50% do Pó de Exaustão

Uma amostra do concreto com 50% foi analisada por EDS verificando a presença dos elementos químicos numa determinada área. Comprovando a interação do resíduo Pó de Exaustão com os componentes do concreto (Figura 51).

Nesta área analisada foram identificados os elementos: O, Ca, Si, C, K, Al, Fe, Mg e Na, bem distribuídos em toda área. Si, Ca, Fe e Mg, provenientes do cimento, o Si também constituinte da areia e Pó de exaustão, o Ca e Na são constituintes da argila que compõem o Pó de exaustão.

Figura 51 - MEV EDS concreto 50% - aumento de 184x



Na mesma amostra fez-se a análise pontual indicados na figura 52. Os respectivos espectros mostrados nas figuras 53 e 54.

Figura 52 - MEV EDS Pontual do concreto 50% - aumento de 184x

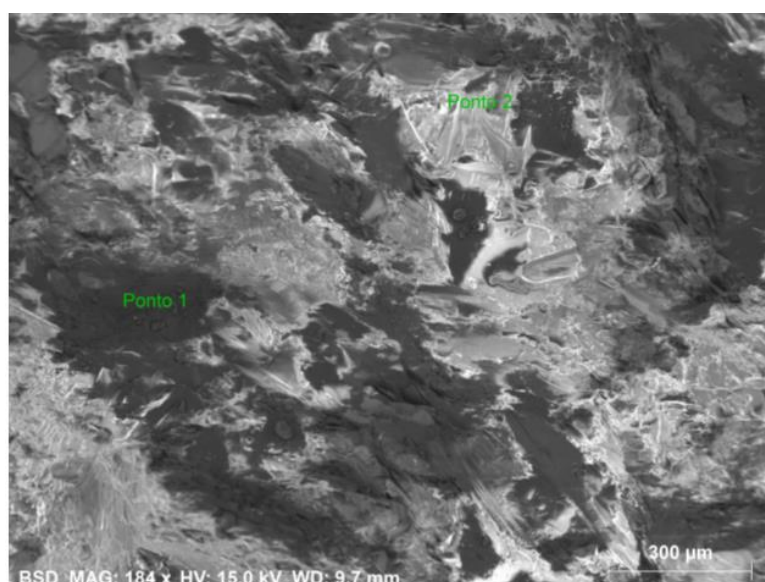
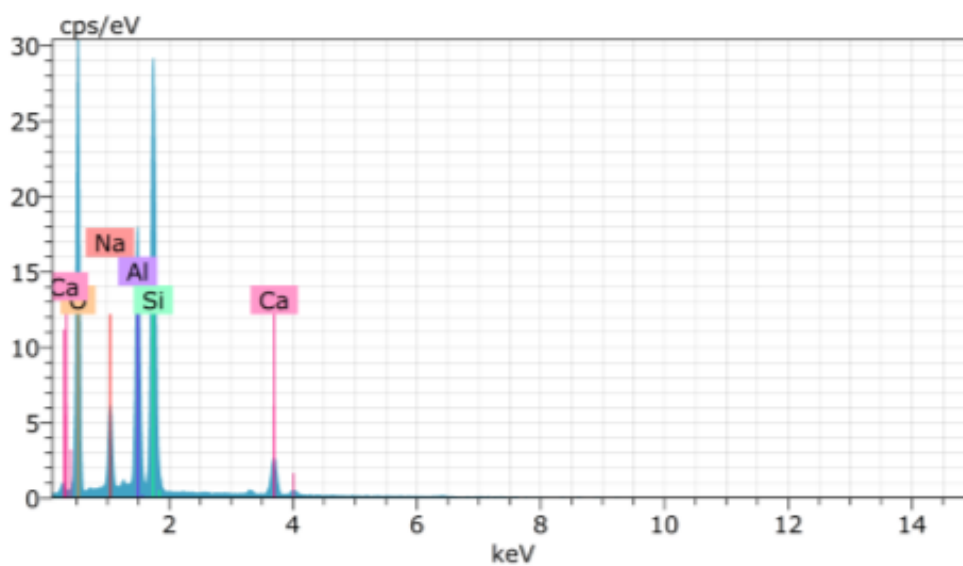
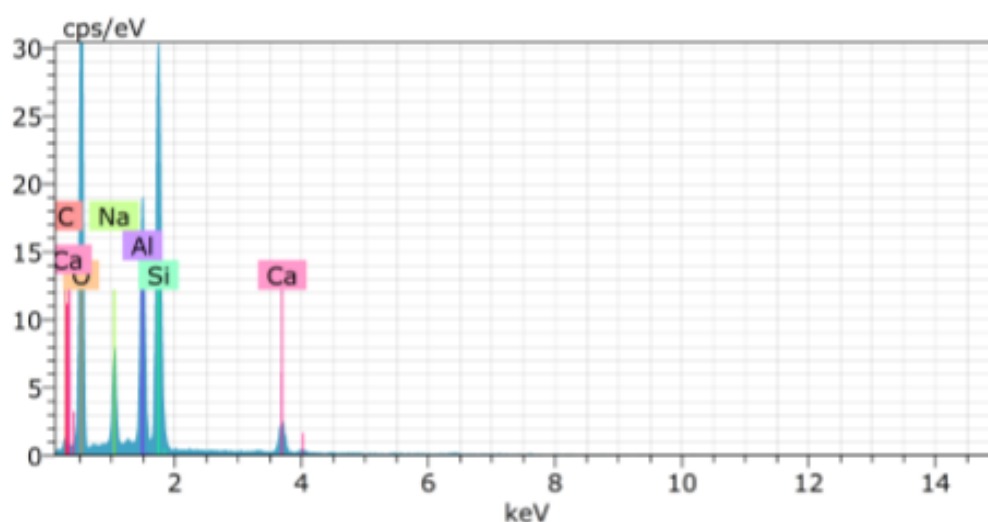


Figura 53 - MEV EDS obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados no ponto 1.



Elemento	Número Atômico	Peso normalizado % Peso
O	8	52,29
Si	14	23,81
Al	13	12,81
Na	11	5,84
Ca	20	5,25
Total		100,00

Figura 54 - MEV EDS - Espectro obtido por microanálise de raios-X característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados no ponto 2.



Elemento	Número Atômico	Peso normalizado % Peso
O	8	54,34
Si	14	20,25
Al	13	11,10
Na	11	5,94
C	6	4,47
Ca	20	3,90
Total		100,00

Analisando 2 pontos da amostra do concreto com 50% do Pó de Exaustão, os elementos químicos encontrados foram Oxigênio (O) em maior quantidade, o Silício

(Si), Cálcio (Ca), Carbono (C), Alumínio (Al) e Ferro (Fe) presentes no cimento na forma de Silicatos, Aluminatos e Ferro-Aluminatos; o Silício também na forma de óxidos provenientes da areia de ADF, o Sódio (Na) do Carbonato de Sódio, Barrilha, o Silício, Alumínio e Magnésio nas formas de Silicato de Alumínio e Magnésio Hidratado também proveniente da argila de bentonita. Pode-se observar que todos os elementos presentes são provenientes dos compostos da mistura do concreto com o Pó de exaustão. Além disto certifica-se a ausência de elementos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente.

4.4.7 Periculosidade

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização da amostra de mistura com 50% do Pó de exaustão estão descritos nas tabelas 14, 15 e 16. Estes foram fornecidos pela indústria em estudo.

Tabela 14 - Características Massa Bruta do Concreto 50%

Parâmetros	Unidade	Resultados	Limite Máximo
Aspecto do Resíduo	-	Sólido	-
Cor	-	Cinza	-
Presença de líquidos	-	Não	-
% Sólidos	%	93	-
% Umidade	%	7	-
pH da Amostra sol.1:1	-	12,0	2 – 12,5
Cianeto	mg/kg	<0,20	-
Ponto de Fulgor °C	°C	>250	60
Óleos e Graxas	%	<0.05	-
Sulfeto	Mg/kg	<0,05	500
Fator de Umidade	-	0,93	-

Fonte: adaptado de Figueiredo (2016)

A mistura de Concreto com 50% do resíduo apresentou pH igual a 12, ou seja, dentro dos limites da Norma NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a) para ser caracterizado como não corrosivo.

➤ Extrato lixiviado

A tabela 17 apresenta a concentração, no extrato lixiviado, de alguns elementos químicos encontrados no concreto com 50% do resíduo, os quais foram comparados com os limites máximos permitidos pela norma de classificação de resíduos, NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a) e valores máximos COPAM/MG.

Tabela 15 - Características Químicas - Extrato Lixiviado do Concreto 50%

Parâmetro	Unidade	Resultados	Limite máximo	
			ABNT mg/L	Valores Máximos COPAM *
Arsênio	mg/L	< 0,010	1,0	0,50
Bário	mg/L	0,211	70,0	10,0
Cádmio	mg/L	< 0,001	0,5	0,10
Chumbo	mg/L	< 0,010	5,0	0,50
Cromo total	mg/L	< 0,010	1,0	0,50
Fluoretos	mg/L	0,57	150,0	-
Mercúrio	mg/L	< 0,010	0,1	0,02
Selênio	mg/L	< 0,010	1,0	0,10
Orgânicos	mg/L	< LM	Anexo F	

Fonte: Adaptado de Figueiredo (2016);

(*) Extrato lixiviado obtido conforme a norma da ABNT NBR 10.005 (ABNT, 2004b).

Os parâmetros analisados apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo F da Norma NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a) e, portanto, o concreto foi classificado como Não Perigoso.

➤ Extrato Solubilizado

Alguns elementos solubilizados em água estão indicados na Tabela 18 e foram comparados os limites máximos estabelecidos pela ABNT 10004/2004 (2004a).

Tabela 16 - Características Químicas - Extrato Solubilizado do Concreto

Parâmetro	Unidade	Resultados Analíticos	Limite máximo mg/L	Valores Máximos COPAM **
Alumínio	mg/L	0,088	0,2	
Arsênio	mg/L	<0,010	0,01	
Bário	mg/L	<0,010	0,7	
Cádmio	mg/L	<0,001	0,005	
Chumbo	mg/L	<0,010	0,01	
Cianeto	mg/L	0,02	0,07	2,0
Cloretos	mg/L	10,0	250,0	2500,0
Cobre	mg/L	<0,009	2,0	2,5
Cromo total	mg/L	<0,010	0,05	
Ferro	mg/L	0,024	0,32	15,0
Fluoretos	mg/L	0,09	1,5	14,0
Manganês	mg/L	<0,010	0,1	0,5
Merúrio	mg/L	<0,0002	0,001	
Nitrato (como N)	mg/L	0,90	10,0	
Prata	mg/L	< 0,010	0,05	
Selênio	mg/L	< 0,010	0,01	
Sódio	mg/L	14,7	200,0	2500,0
Sulfato (SO ₄)	mg/L	12,0	250,0	2500,0
Surfactantes	mg/L	< 0,15	0,5	
Zinco	mg/L	<0,010	5,0	25,0
Fenóis	mg/L	< 0,00001	0,01	3,0
Outros Orgânicos	mg/L	< LM	Anexo G	

Fonte: Adaptado de Figueiredo (2016)

(**) Extrato aquoso obtido conforme descrito na NBR 15702 de 2009.

Os parâmetros analisados apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo G da Norma NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a) e, portanto, a amostra de concreto foi classificada como CLASSE II B, Não Perigoso, Inerte.

5 CONCLUSÕES

O resíduo, Pó de exaustão, foi analisado quanto às suas propriedades físicas, químicas e morfológicas e de acordo com revisão bibliográfica, é possível o seu uso, como substituto parcial do agregado miúdo, em concreto. Portanto, avaliou-se posteriormente, qual a porcentagem ideal para que a mistura adquira boa resistência mecânica de tração e compressão.

Em relação ao concreto fresco observou-se que o uso do Pó de Exaustão não prejudicou a consistência e trabalhabilidade da mistura até 50%.

Para o concreto endurecido, a resistência mecânica à compressão, a tração e módulo de elasticidade tiveram aumentos não significativos, pois estavam dentro do desvio padrão, com aumento da idade e aumento do resíduo. Apresentando melhor resultado com 40% do Pó de Exaustão.

Em relação à absorção por imersão em água e o índice de vazios, diminuíram com o aumento do resíduo mostrando menor resultado com 40% mostrando que o concreto ficou mais denso.

Os resultados da análise química, lixiviação e solubilização, mostram que as substâncias que ultrapassaram os limites máximos permitidos pela norma ABNT 10.004/2004, na análise do Pó de Exaustão, foram encapsulados no concreto. O Concreto foi classificado como CLASSE II B, Não Perigoso, INERTE.

Através da análise por EDS pode-se observar os elementos provenientes da mistura do concreto com Pó de Exaustão e constatar a ausência de elementos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente.

Com os resultados desta pesquisa, busca-se fomentar que a indústria de fundição em questão possua mais subsídios para que os órgãos ambientais competentes estimulem o reuso do resíduo em construção civil, aumentando a possibilidade de reaproveitamento reduzindo a disposição em aterros industriais trazendo benefícios econômicos e ambientais.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Avaliar as propriedades mecânicas do concreto com substituição parcial da areia por Pó de exaustão utilizando cimento comum CP II.
- ✓ Analisar as propriedades mecânicas do concreto armado com utilização do Pó de exaustão, considerando a permeabilidade e corrosividade.
- ✓ Utilizar o Pó de Exaustão para fabricação de blocos de cimento e tijolos cerâmicos.
- ✓ Confeccionar Concreto Auto adensável (CAA) com utilização de Pó de Exaustão
- ✓ Propor a inserção do Pó de Exaustão como cobertura para aterros de resíduos sólidos urbanos/domiciliares utilizando os princípios da co-disposição, no Plano de Gestão de Resíduos Sólidos do município da indústria em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEGAS, R. G. (2007), **Perfil Ambiental dos Processos de Fundição Ferrosa que Utilizam Areias no Estado do Rio Grande do Sul**, 2007, 120 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS, Porto Alegre, 2007.

ALMEIDA, L. C. (2002), **Notas de aula da Disciplina Estruturas IV - Concreto Armado**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2002, 24 p.

ALVES, B. S. Q. (2012), **Estudo da Viabilidade Ambiental da Reutilização das Areias Descartadas de Fundição**, 239 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

ANDOLFATO, R. P. (2002), **Apostila Controle Tecnológico Básico do Concreto**, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Ilha Solteira, SP, 2002, 30 p.

ARMANGE, L. C. (2005), **Utilização de Areia de Fundição Residual para Uso em Argamassa**, 104 p. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Joinville, 2005.

Associação Brasileira de Cimento Portland. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).

Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP – **Pesquisa Inédita e Exclusiva Revela Cenário do Mercado Brasileiro de Concreto**, (2013), Disponível em www.abcp.org.br acesso em março de 2014.

Associação Brasileira da Indústria de Fundição, ABIFA (1999) - COMISSÃO de MEIO AMBIENTE da ABIFA, **Manual de Regeneração e Reuso de Areias de Fundição**, São Paulo, pp. 1-49, 1999.

_____. Resíduo de Fundição: Solução a Caminho, **Revista da ABIFA Fundição & Matérias-Primas**, 95ª ed., março 2008.

_____. Atividades das comissões de estudo instaladas. **Revista Fundição & Matérias-Primas**, 113ª ed., São Paulo, outubro 2009.

_____. Comissão do Meio Ambiente, **Revista da ABIFA, Fundição & Matérias-Primas**, 123ª ed., pp 82-84, agosto 2010.

_____. **Anuário ABIFA 2012**, Guia ABIFA de Fundição, junho 2012.

_____. ABNT/CB 59, Comitê Brasileiro de Fundição, O Fórum de Normalização do setor da Fundição, Atividades das Comissões de Estudos Instaladas, **Revista da ABIFA, Fundição & Matérias-Primas**, 153ª ed., pp. 58-59, setembro 2013.

_____. **Anuário ABIFA 2015**, Indústria de Fundição no Brasil, pp.22-25, junho de 2015a.

_____. Comitê Brasileiro de Fundição, O Fórum de Normalização do setor da Fundição, Atividades das Comissões de Estudos Instaladas, **Revista da ABIFA, Fundição & Matérias-Primas**, 180ª ed., pp 30-32, maio de 2015b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT - NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação, Rio de Janeiro, RJ, 2004a;

_____NBR 10005 – Procedimento Para Obtenção do Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos – Rio de Janeiro, 2004b.

_____NBR 10006 – Procedimento para Obtenção do Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos – Rio de Janeiro, 2004c.

_____NBR 10007 – Amostragem de resíduos, Rio de Janeiro, 2004d.

_____NBR 15702 – Diretrizes para aplicação de Areia Descartada de Fundição em Concreto Asfáltico e Aterros Sanitários, Rio de Janeiro, 2009.

_____NBR 15984 – Areia Descartada de Fundição - Central de Processamento, Armazenamento e Destinação (CPAD), Rio de Janeiro, 2011;

_____NBR NM 52 - Agregado Miúdo, Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente, Rio de Janeiro, 2009.

_____ NBR NM 53 - Agregado Graúdo, Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, 2009.

_____NBR NM 248 - Agregados - Determinação da Composição Granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

_____NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.

_____NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação, Rio de Janeiro, 2005.

_____NBR 6118 – Projetos de Estruturas de Concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

_____NBR 9778 - Concreto endurecido — Determinação da Absorção de água, Índice de vazios e Massa Específica, Rio de Janeiro, 2005.

_____NBR 67 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro, 1998.

_____NBR 5738 – Procedimento para Moldagem e cura de corpos-de-prova, Rio de Janeiro, 2015.

_____NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.

_____ NBR 7222 - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por **compressão diametral** de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2010.

_____ NBR 8953 - Concreto para fins estruturais —Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, Rio de Janeiro, 2015.

ASSUNÇÃO, J. W. (2009), **Dosagem Racional do concreto**, 64 p., Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR.

BARROS, R. M. (2013), **Tratado Sobre Resíduos Sólidos - Gestão, Uso e sustentabilidade**, ed. Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 2013, cap. 9, pp. 229-288.

BARROS, R. M.; PINTO, F. B.; BRITO, R. C.; SILVA, G.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, F. G. S. (2014), Study of the properties of concrete partially containing waste foundry sand as aggregate, **Advanced Materials Research** (Online), v. 838-841, p. 131-136, 2013.

BAUER, L. A. F., **Materiais de construção I e II**, Apostilado Curso de Engenharia Civil, Pontifca Universidade Católica do Paraná, 1999.

BAUMER, B. (2004), **Influência do Teor de Finos nas Propriedades Tecnológicas da Areia Verde**, 45 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville, SC.

BENSON, C.H.; BRADSHAW, S. (2011) - User Guideline For Foundry Sand In Green Infrastructure Construction, **Recycled Materials Resource** Center University of Wisconsin, Madison, WI, 2011.

BONET, I. I. (2002), **Valorização do Resíduo Areia de Fundição (RAF): Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo C.B.U.Q.**, 131 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BORGES, M. M. (2002), **Fundição**, Engenharia do Produto, Processos Produtivos <http://mmborges.com/processos>, acesso em 09/09/2016.

BRASIL (1981), Lei Federal nº 6938 de 31 de agosto de 1981, Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 de setembro de 1981.

BRASIL (1986), CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, CONAMA, Resolução nº 001 de 23 de janeiro de 1986, Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 de fevereiro de 1986.

BRASIL (1998), Lei Federal nº 9605 de 12 de fevereiro de 1998, Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 de fevereiro de 1998 e retificado em 17 de fevereiro de 1998.

BRASIL (2010a), Lei Federal nº 12305 de 02 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto nº 7404 de 23 de dezembro de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

CAMPOS FILHO, M. P. (1978), **Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas**- Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ, 1978, 246 p.

CARNIN, R. L. P. (2008), **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal do Paraná. UFPR. Curitiba. 2008.

CARNIN, R. L. P., SILVA, C. O., POZZI, R. J., CARDOSO JR, D., FOLGUERAS, M. V.; MALKOWSKI, W. (2010), Desenvolvimento de Peças de Concreto (PAVER) Contendo Areia Descartada de Fundação Para Pavimento Intertravado, **Revista Pavimentação**, ano V, pp 56-87, out./nov./dez./2010.

CASOTTI, B. P., DEL BEL FILHO, E.; CASTRO, P. C. (2010), Indústria de Fundação no Brasil: Situação Atual e Perspectivas, **Revista Metalurgia**, BNDES setorial 53, pp. 121-162, 2010.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3677-processos-tpicos Acesso em: março de 2014

CHEGATTI, S.; CARNIN, R. L. P.; MAÇANEIRO, P. C. (2014), Caminho Sustentável Para as Areias Descartadas de Fundação Evolui, **Revista da ABIFA, Fundação & Matérias-Primas**, Ed 171, pp 20-22, agosto 2014.

CORRÊA, L. R. (2009), **Sustentabilidade na Construção Civil**, 70 p. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2009.

COSTA, C; PINTO, S; VENTORINI, L. A.; VIEIRA, A.; INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA - IME (2010), Areia Descartada De Fundação em substituição ao Agregado Fino em Misturas Asfálticas Para Pavimentação, **Revista da ABIFA, Fundação & Matérias Primas**, ed.123, pp. 100-110, ago. 2010.

COUTINHO NETO, B.; FABBRI, G. T. P. (2004), Avaliação da Reutilização da Areia de Fundação Em Misturas Asfálticas Densas do Tipo CAUQ, **Revista Transportes**, vol. XII, pp. 50-57, dez. 2004.

DALLA VALENTINA L. V. O.; KOCH A.; SANTOS, C. C.; (2013), Uso de Resíduo de Fundação, Pó de Exaustão, em Argamassas. In: **23º SIC UDESC Seminário de Iniciação Científica, Universidade do Estado de santa Catarina**, Joinville, SC, 2013.

DA SILVA, W. R. L.; TOCHETTO, E.; PRUDENCIO JÚNIOR, L. R.; OLIVEIRA, A. L. (2011), Influência do emprego de areia de fundição residual nas propriedades no estado fresco e endurecido de misturas cimentícias, **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, Volume 4, n 4, p. 642-662, out. 2011;

DNIT (2004), Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Ministério dos Transportes, Norma DNIT 031/2004 ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico - Especificação de Serviço, Rio de Janeiro, 3 de agosto de 2004, 13 p.

DOBOSZ, S. M., JELINEK, P; MAJOR-GABRYS, K., Tendências de Desenvolvimento das Areias de Moldagem e de Machos, Tradução Alberto Seabra da Costa, **Revista da ABIFA, Fundação & Matérias-Primas**, Ano XVI, ed. 153, pp. 74-83, São Paulo, 2013b.

EFFTING, C. (2014), **Propriedades do Concreto Fresco e Endurecido**, Disciplina Materiais de Construção Civil II, Departamento de engenharia Civil - Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Joinville, SC, 59p, 2014.

FAGUNDES, A. B.; Vaz, C. R.; OLIVEIRA, I. L. (2009), O Fortalecimento do setor de Fundição através da aplicação de conceitos e metodologias ambientais: Os excedentes de areia de fundição em foco, **Revista da ADMpg Gestão Estratégica**, Ponta Grossa, v. 2, n. 2, pp. 27-34, 2009.

FAGUNDES, A. B.; Vaz, C. R.; OLIVEIRA, I. L. (2011), A Logística Reversa Aplicadas às Areias de Fundição, **Revista ABIFA Fundição & Matérias-Primas**, ed. 131, pp 22-30, 2011.

FAGUNDES, A. B.; Vaz, C. R.; OLIVEIRA, I. L.; KOVALESKI, J. L. (2010), Caminhos Para a Sustentabilidade do Setor de Fundição no Brasil - **Gestão de Produção, Operações e Sistemas**, **GEPROS** - Ano 5, nº 2, pp. 27-40, abr.-jun. 2010.

FAGUNDES, A. B. (2010), **Mapeamento do Gerenciamento das Areias A Verde de Fundição no Estado do Paraná Sob a Ótica da Produção Mais Limpa: Uma Contribuição para o Estabelecimento de Estratégias**, 141 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta Grossa, 2010.

FIGUEIREDO, E. P. (2016), **Relatório de Ensaio nº 30395/2016 1.0**, EP Engenharia do Processo Ltda., Guarulhos, SP, 7 p (2016)

FENGLER, R. Z.; GARCIA, E. S. H.; ANJOS, F. D.; PIZUTTI, J. T.; ZAPPE, A. P. S.; ECHEVERRIA, J. A. S. (2015), Avaliação Laboratorial da Utilização do Resíduo (Areias) de Fundição no Concreto Asfáltico Convencional, **4ª RAPv REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO E 18º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA**, Foz do Iguaçu, PR, 18 a 21 de agosto de 2015.

FOGUESATTO, A. F. (2007), **Estudo de Utilização de Areia Residual do Processo de Fundição como Agregado Para Concreto**, 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Regional do Rio Grande do Sul, UNIJUI, Ijuí, RS, 2007.

FRASSON, B. B; PELEGRIN, T. P. (2012), Estudo da Viabilidade de Utilização da Areia de Fundição em Massa de Cerâmica Vermelha, **Revista ANICER**, nº 78, pp 34-42.

FREITAS JUNIOR, J. A. (2013), **Apostila de Materiais de Construção II – Agregados**, Universidade Federal do Paraná, UFPR, 2013.

GARCIA FILHO, F. (2008), ADF - Soluções Para as Areias Descartadas com o Trabalho da ABIFA, **Revista ABIFA, Fundição & Matérias-Primas**, ed. 97, pp.66-69, maio 2008.

GIONGO, J. S. (2007), **Concreto Armado, Introdução e Propriedades dos Materiais**, Departamento de Engenharia de Estruturas, USP, São Carlos.

GUNEY, Y.; SARI, Y. D.; YALCIN, M.; TUNCAN, A.; DONMEZ, S. (2010), Re-Usage of Waste Foundry Sand in High-Strength Concrete, **Waste Management**, n. 30, pp. 1705–1713.

HINDMAN, J. M.; STEHOUWER, R. C.; MACNEAL, K. E. (2008), Spent Foundry Sand and Compost in Blended Topsoil: Availability of Nutrients and Trace Elements, **Journal of Residuals Science & Technology**, v. 5, n. 2, Abril 2008.

ITAJUBÁ, PMI (sd), Plano Municipal de Saneamento Básico de Itajubá, Disponível em: http://www.itajuba.mg.gov.br/semma/plano_municipal_de_saneamento_basico.php. Acesso em dezembro de 2016.

JAVED, S; LOVELL, C. W. (1994), **Use of waste foundry sand in highway construction**. Department of Civil Engineering, Purdue University; 1994.

JOHN, V. P. (1999), Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil, In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, São Paulo. **Anais**. São Paulo, IBRACON, 1999, pp 44-45.

JOHN, V.M. (2000), **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

JOHNSON, C.K. "Phenols in Foundry Waste Sand," **Modern Casting**, Ed. American Foundry Society, v. 71, 1981.

KACHA, S. M.; NAKUM, A. V.; BHOGAYATA, A. C. (2014) - Use of Used Foundry Sand in Concrete: A State of Art Review, In: **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 03, 2014, pp. 586-589, fev. 2014.

KHATIB, J. M. HERKI, B. A.; KENAI, S. (2013), Capillarity of Concrete Incorporating Waste Foundry Sand, **Construction and Building Materials**, n. 47, pp. 867–871, 2013.

KNOP, W. R.; DALLA. VALENTINA, L.; FOLGUEIRAS, M. V.; SEMPTIKOVSKI, S. C. (2009), **A Incorporação de Pó de Exaustão em Massa Cerâmica Atomizada Tipo Semigrês**, 12 p. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, 2009.

KOENIG, V. R.; SANTOS, R. W.; SECOMANDI, R., (2015a), Relatório de Ensaio nº 7206/2016-1.0. **Areia de Exaustor de Fundição – Rebarbação**, TASQA Serviços Analíticos Ltda, 11 p, Paulínia, SP

KOENIG, V. R.; SANTOS, R. W.; SECOMANDI, R., (2015b), Relatório de Ensaio nº 7204/2016-1.0. **Areia de Exaustor de Fundição – Sistema Areia**, TASQA Serviços Analíticos Ltda, 11 p, Paulínia, SP

KULAIF, Y. (2014), Areia para Construção, **Sumário Mineral 2014**, Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM, Ministério de Minas e Energia, Brasília, v 34, pp 32-33, 2014.

LA SEMA, H. A. (2009), Agregados para a Construção Civil, **Sumário Mineral 2009**, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) - Ministério de Minas e Energia (MME), vol. 29, pp 8-9.

LOPES L. R. N. (2009), **Avaliação da Redução dos Resíduos Sólidos de Areia Resinada em Fundição do Aço Através de Recuperação Térmica**. 111 p.

Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, BA, 2009.

MARCO (2016) – Assessoria em areia de moldagem a verde contato@areiaverde.com, Disponível em www.areiaverde.com, acesso em 04/09/2016

MARTINS, A.; MARCONDES, C. G.; MADI, F.; NEVES, I. F., AOKI, J.; TOKUDOME, N. e MERCADÊ, S. R. (2008), **Apostila Cimento Itambé**, Curitiba, PR, 23 p.

MASTELLA, M. A.; GISLON, E. S.; PELISSER F.; RICKEN C.; SILVA L.; ANGIOLETTO E.; MONTEDO, O. R. K. (2014) , Mechanical and Toxicological Evaluation of Concrete Artifacts Containing Waste Foundry Sand, **Waste Management**, n. 34, pp.1495–1500, 2014.

MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (1994), **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Editora PINI, São Paulo, 1994, 573p.

MINAS GERAIS, CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL COPAM, Deliberação Normativa nº 196, 03 de abril de 2014. Dispõe sobre a utilização da areia descartada de fundição na produção de artefatos de concreto sem função estrutural. Norma Estadual – Belo Horizonte, Mg, 08-de abril de 2014.

MONOSI, S.; SANI, D.; TITTARELLI, F. (2010), Used Foundry Sand in Cement Mortars and Concrete Production, **The Open Waste Management Journal**, n. 3, pp. 18-25, 2010.

MORAES, C. A. M. (2002), Reciclagem de resíduos sólidos de fundição: uma análise crítica. In: **57º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM) - Internacional**. 2002, São Paulo, SP, pp. 1550-1559.

MOREIRA, A. R. (2004), **Apostila de Tecnologia do Concreto**, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 102p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. (2013). **Tecnologia do concreto**. Tradução: CREMONINI, R. A. 2nd ed., Bookman Editora Ltda., São Paulo, 2013.

PABLOS, J. M. (2008), **Estudo Para a Reutilização de Resíduo Sólido Constituído Pelas Areias de Fundição Aglomeradas com Argila, Através da Técnica de Solidificação/Estabilização em Matrizes de Cimento Portland, Para a Aplicação no Setor da Construção Civil**, 146 p. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 2008.

PARANÁ, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, SEMA (2014), Resolução nº 016 de 26 de março de /2014, Dispõe sobre os critérios para qualidade do ar, padrões de emissão para fundição de metais”. **Diário Oficial do Estado** número 9187, Curitiba, PR, 15 de abril de 2014, pp 48.

PARANÁ, Instituto Ambiental Paranaense, IAP. Portaria nº 224/07 de 02 de dezembro de 2007. Estabelece os critérios para exigência e emissão de Autorizações Ambientais para as Atividades de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, **Diário Oficial do Estado**, Curitiba, PR, 14 de dezembro de 2007.

PAULA, J. L.; DUARTE, M. N. (1997), **Manual de Métodos de Análise de Solo**, EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro, 2ª ed.

PAVESI, I.; PFITSCHER, E. D. (2014), Logística Reversa: Estudo da Sustentabilidade Ambiental Em Uma Indústria Catarinense Sobre As Areias Descartadas de Fundação, In: **Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente ENGEMA**, 2014, São Paulo, SP.

PEDROSO, F. L. (2009), Concreto: As origens e a Evolução do Material Construtivo Mais Usado pelo Homem, **Revista Concreto & Construções**, IBRACON, Ed. 53, pp 14-19.

PENATTI JUNIOR, E. (2014), Areia Descartada de Fundação (ADF) Transformada em Blocos de Concreto, **Revista da ABIFA, Fundação & Matérias-Primas**, Ed 171, pp 24-25, agosto 2014.

PENKAITIS, G. (2012), **Impacto Ambiental Gerado Pela Disposição de Areias de Fundação: Estudo de Caso**, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 93 p.

PEREIRA, H. R. S., (2014), **Proposta de Formulação de Argamassas para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos com Incorporação de Pó de Exaustão de Fundação**; 2014; Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Joinville, SC,

PEREIRA, R. L.; CUNHA, C. J.; MATTOSO FILHO, N. P.; MOMM, L. (2005), Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundação como Agregado em Misturas Asfálticas, In: **12º CONAF- Congresso de Fundação**, set/2005, São Paulo, SP, 10 p.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. (2004), Estruturas do Concreto In: PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto e Projetos de Edifícios**, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 2004, cap. 1 e 2, pp 1-19.

PRABHU G.G., HYUN, J.H.; KIM, Y.Y. (2014), Effects of Foundry Sand as a Fine Aggregate in Concrete Production, **Construction and Building Materials**, n. 70, pp. 514–521, 2014.

RIBEIRO, R. A. C.; MYNRIN, V. A.; JUNIOR, V. M. T.; PONTE H. de A. (2006), Utilização do Pó de Exaustão e Areia de Fundação no Desenvolvimento de Cerâmica Vermelha, In: **17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2006, Foz do Iguaçu, PR.

RIBEIRO, R. A. C. (2008), **Desenvolvimento de Novos Materiais Cerâmicos A Partir de Resíduos Industriais Metal-Mecânicos**, 104 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná UFPR, Curitiba, PR, 2008.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo: ABCP, 1998.

SALOMÃO, F. X. T. (2010), Notas de Aula de **Composição e morfologia de solos**, Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT, Cuiabá.

SANCHÈZ, L. E. (2008), **Avaliação de Impacto Ambiental - Conceitos e Métodos**, 1ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2008, 584 p.

SANTA CATARINA, SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL, CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - CONSEMA, RESOLUÇÃO Nº. 26, de 06 de setembro de 2013. Estabelece as diretrizes sobre a utilização das Areias Descartadas de Fundição – ADF e adota outras providências. **Diário Oficial** nº 19661, Florianópolis, SC, 16 de setembro de 2013, pp 05 a 07.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; DOS ANJOS, L. H. C. (2005), **Manual de descrição e coleta de solo no campo**, Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, MG, 5ª ed., 100 p.

SANTOS, C. C. (2011), **Análise do Uso do Pó de Exaustão Proveniente do Sistema de Regeneração de Areia de Macharia em Concreto Convencional**, 109 f, Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina UDESC, Joinville, SC.

SANTOS, C.C.; DALLA VALENTINA, L. V. O.; SOUZA, R. O. (2015), Caracterização do Resíduo Pó de Exaustão de Fundição na Indústria da Construção Civil, **Revista Espacios**, vol. 36, nº5, p. 9.

SÃO PAULO, 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.

SENAI (1987) - Serviço Nacional de Aprendizagem industrial, **Areias de Fundição Aglomeradas com Argila**, vol. I, Belo Horizonte, MG, 1987.

SIDDIQUE R.; SCHUTTER G.; NOUMOWE A. (2009), Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete, **Construction and Building Materials**; n. 23(2), pp. 976–80, 2009.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. (2011) Utilization of Waste Foundry Sand (WFS) in Concrete Manufacturing; **Resources, Conservation and Recycling**, n. 55, pp. 885-892, 2011.

SIDDIQUE R.; KADRI E. (2011), Effect of Metakaolin and Foundry Sand on the Near Surface Characteristics of Concrete, **Construction and Building Materials**, n. 25, pp 3257-3266, 2011.

SIDDIQUE R.; AGGARWAL Y.; AGGARWAL P.; KADRI E. H.; BENNACER B. , (2011), Strength, Durability and Micro-Structural Properties of Concrete Made With Used-Foundry Sand (UFS). **Construction and Building Materials**, n. 25: pp.1916–25, 2011.

SIDDIQUE R, SINGH, G, BELARBI R. AIT-MOKHTAR K.; KUNAL (2015), Comparative Investigation on The Influence of Spent Foundry Sand as Partial Replacement of Fine Aggregates on The Properties of Two Grades of Concrete, **Construction and Building Materials**, n. 83, pp.216–222, 2015.

SINGH G.; SIDDIQUE R. (2012), 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**, n. 26, pp. 416–422, 2012.

SILVA, C. E., SILIDÔNIO JUNIOR. L. C.; SILVA, R. E. B. (2011), Aspectos Qualitativos de Fabricação de Blocos de Concreto Utilizando Resíduos de Areia de Fundição, In: **XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP**, out. 2011, Belo Horizonte, MG, 9 p.

SOUZA JUNIOR, T. F. (2003), **Estruturas de Concreto Armado** – Notas de Aula, Universidade federal de Lavras, UFLA, Lavras, MG, 2003, 23p.

SPOSTO, R. M. (2006), Os Resíduos da Construção Civil: Problema ou Solução? **Revista Espaço Acadêmico**, nº 61, jun. 2006.

TOLEDO, E. B. S. (2006), **Método de Utilização de Areia de Fundição e Resíduos de Poeira de Jateamento (Microesferas de vidro) Para Produzir Cerâmica Vermelha**, 110 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006

USEPA, United States Environmental Protection Agency (2015) - **Reuse of Spent Foundry Sands Yields Environmental Benefits**, Washington, DC, 01 de agosto de 2015. Disponível em: www.epa.gov. Acesso em setembro de 2015.

USEPA, Environmental Protection Agency. **Foundry Sands Recycling**. Washington, DC: US EPA; 2007, Report nr EPA 530-F-07-018.

VALVERDE, F. M.; TSUCHIYA, O. Y. (2007), Visão da Mineração de Agregados no Brasil: Diagnóstico, tendências e desafios - ANEPAC Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil, 2007.

WATANABE, F. A. (2004), **Estudo Sobre a Utilização de Areia de Fundição Residual Como Agregado na Confecção de Pavimentos de Concreto**, 121 p. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Joinville, SC, 2004.

APÊNDICE A - Análises físicas dos agregados

- Massa Específica e Massa Aparente conforme a **Norma NM 52/2009**

Pó de Exaustão FEPI

$m_s = 500\text{g}$ (massa saturada)

$m_1 = 500\text{g} + \text{recipiente} = 500 + 220,52\text{g} = 774,7\text{g}$

$m_2 = \text{areia} + \text{recipiente} + \text{água} = 1079,2$ (após 1 h)

$\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$

Após 24h na estufa: $m = 501,20\text{g}$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad V_a = \frac{1079,2 - 774,7}{1} = 304,5\text{ml}$$

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} = \frac{501,2}{500 - 304,5} = 2,564 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Densidade aparente})$$

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} = \frac{500}{195,5} = 2,558 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Densidade saturada})$$

$$d = \frac{m}{(V - V_a) - \left(\frac{m_s - m}{\rho_a}\right)} = \frac{501,2}{(500 - 304,5) - \left(\frac{500 - 501,2}{1}\right)} = 2,548 \text{ g/cm}^3$$

Pó de Exaustão FEPI

$m_s = 500\text{g}$ (massa saturada)

$m_1 = 500,01\text{g} + \text{recipiente} = 775,94\text{g}$

$m_2 = \text{areia} + \text{recipiente} + \text{água} = 1087,02$ (após 1 h)

$\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$

Após 24h na estufa: $m = 497,57\text{g}$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad V_a = \frac{1087,02 - 775,94}{1} = 311,08\text{ml}$$

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} = \frac{497,57}{500 - 311,08} = 2,63 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Densidade aparente})$$

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} = \frac{500,01}{188,92} = 2,65 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Densidade saturada})$$

$$d = \frac{m}{(V - Va) - \left(\frac{ms - m}{\rho a}\right)} = \frac{497,57}{(500 - 311,08) - \left(\frac{500 - 497,57}{1}\right)} = 2,668g/cm^3$$

$$\text{Media} = 2,608 g/cm^3$$

Massa Específica - AREIA COMUM- FEPI

$m_s = 500g$ (massa saturada)

$m_1 = 500,0g + \text{recipiente} = 500,00 + 220,52g = 775,5g$

$m_2 = \text{areia} + \text{recipiente} + \text{água} = 1046,7g$ (após 1 h)

$\rho_a = 1 g/cm^3$

Após 24h na estufa = m seca + refratário = 879,2g (refratário = 406,3g)

$m = 472,9$

$$Va = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad Va = \frac{1046,7 - 775,5}{1} = 271,2ml$$

$$d_1 = \frac{m}{V - Va} = \frac{472,9}{500 - 271,2} = 2,067 g/cm^3 \quad (\text{Densidade aparente})$$

$$d_2 = \frac{m_s}{V - Va} = \frac{500,00}{228,8} = 2,185 g/cm^3 \quad (\text{Densidade saturada})$$

$$d = \frac{m}{(V - Va) - \left(\frac{ms - m}{\rho a}\right)} = \frac{472,9}{(500 - 271,2) - \left(\frac{500 - 472,9}{1}\right)} = 2,345g/cm^3$$

AREIA COMUM- FEPI

$m_s = 500g$ (massa saturada)

$m_1 = 500,0g + \text{recipiente} = 778,99g$

$m_2 = \text{areia} + \text{recipiente} + \text{água} = 1057,58g$ (após 1 h)

$\rho_a = 1 g/cm^3$

Após 24h na estufa = m seca + refratário = 1849,62g (refratário = 1374,79g)

$m = 474,83g$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad V_a = \frac{1046,7 - 775,5}{1} = 278,58 \text{ ml}$$

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} = \frac{472,9}{500 - 271,2} = 2,067 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Densidade aparente})$$

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} = \frac{500,00}{228,8} = 2,185 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Densidade saturada})$$

$$d = \frac{m}{(V - V_a) - \left(\frac{m_s - m}{\rho_a}\right)} = \frac{474,8}{(500 - 278,58) - \left(\frac{500 - 474,8}{1}\right)} = 2,42 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Media} = 2,38 \text{ g/cm}^3$$

➤ Massa Específica Agregado Graúdo

Brita lavada e seca com pano

Recipiente = 0,225g

Msbrita = 3000g imerso em água por 24h

Mbritaumida = 3255g

Balança hidrostática cesto = 0,635g

Ma (peso da brita imersa) = 1910g

Estufa por 24h a 107°

M (massa seca na estufa) = 2990g

$$A = \frac{m_s - m}{m} \quad A = \frac{3000 - 2990}{2990} \times 100 = 0,33\%$$

Massa Específica Agregado Seco

$$d = \frac{m}{m - m_a} = \frac{2990}{2990 - 1910} = 2,768 \text{ g/cm}^3$$

Massa Específica Agregado Saturado Seco

$$d_s = \frac{m_{sss}}{m_s - m_a} = \frac{3000}{3000 - 1910} = 2,752 \text{ g/cm}^3$$

Massa Específica Aparente

$$da = \frac{m}{ms-magua} = \frac{2990}{3000-1910} = 2,743 \text{ g/cm}^3$$

➤ Massa Unitária Solta Brita

Considerações: $\emptyset < 37,5 \text{ mm} \rightarrow$ Método A

Balde = 6,45 kg

Água = 11,30 kg

T= 25° $\rightarrow \rho \text{ água} = 997,61 \text{ g/cm}^3$

Vol. balde= mágua/ $\rho \text{ água} = 11,30 / 997,61 = 0,0113 \text{ m}^3$

P1= 15,65 kg $\rightarrow \rho_1 = 15,65 / 0,0113 = 1384,956 \text{ kg/m}^3$

P2= 15,75 kg $\rightarrow \rho_2 = 15,75 / 0,0113 = 1393,805 \text{ kg/m}^3$

P3= 15,65 kg $\rightarrow \rho_3 = 15,65 / 0,0113 = 1384,956 \text{ kg/m}^3$

Media = 1387,906 $\times 1.01 = 1401,785 \text{ kg/m}^3$

$\times 0,99 = 1374,027 \text{ kg/m}^3$

pas = 1387,906 (1+0,334/100) = 1392,548 kg/m³

➤ Massa Unitária Solta Areia Comum

Considerações: umidade natural; $\emptyset < 37,5 \text{ mm} \rightarrow$ Método A

Balde = 6,40 kg

Água = 11,30 kg

T= 25° $\rightarrow \rho \text{ água} = 997,61 \text{ g/cm}^3$

Vol. balde= mágua/ $\rho \text{ água} = 11,30 / 997,61 = 0,0113 \text{ m}^3$

P1= 12,60 kg $\rightarrow \rho_1 = 12,60 / 0,0113 = 1115,04 \text{ kg/m}^3$

P2= 12,65 kg $\rightarrow \rho_2 = 12,65 / 0,0113 = 1119,47 \text{ kg/m}^3$

P3= 12,40 kg $\rightarrow \rho_3 = 12,40 / 0,0113 = 1097,34 \text{ kg/m}^3$

Media = 1110,617 $\times 1.01 = 1121,728 \text{ kg/m}^3$

$\times 0,99 = 1111,627 \text{ kg/m}^3$

P3 saiu fora

P4= 12,40 kg $\rightarrow \rho_4 = 12,40 / 0,0113 = 1097,34 \text{ kg/m}^3$

$$P5 = 12,30 \text{ kg} \rightarrow \rho_5 = 12,30/0,0113 = 1088,496 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Nova media } \rho_3 + \rho_4 + \rho_5 = 1094,392 \text{ kg/m}^3$$

➤ Massa Unitária Solta Areia Comum

Considerações: seca natural $\emptyset < 37,5 \text{ mm} \rightarrow$ Método A

$$\text{Balde} = 0,956 \text{ kg}$$

$$\text{Água} = 13,951 \text{ kg}$$

$$T = 25^\circ \rightarrow \rho_{\text{água}} = 997,61 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Vol. balde} = \text{máguas} / \rho_{\text{água}} = 13,951 / 997,61 = 0,01303 \text{ m}^3$$

$$P1 = 19,369 \text{ kg} \rightarrow \rho_1 = 19,369 / 0,01303 = 1486,96 \text{ kg/m}^3$$

$$P2 = 19,454 \text{ kg} \rightarrow \rho_2 = 19,454 / 0,01303 = 1493,52 \text{ kg/m}^3$$

$$P3 = 19,541 \text{ kg} \rightarrow \rho_3 = 19,541 / 0,01303 = 1500,18 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Media} = 1493,55 \times 1,01 = 1508,49 \text{ kg/m}^3$$

$$\times 0,99 = 1478,62 \text{ kg/m}^3$$

Índice de Vazios

$$Ev = 100 [(2,42 \times 997,61) - 1483,55] / (2,42 \times 997,61) = 0,38 = 38\%$$

➤ Massa Unitária Solta Pó de Exaustão $\emptyset < 37,5 \text{ mm} \rightarrow$ Método A

$$\text{Balde} = 6,40 \text{ kg}$$

$$\text{Água} = 11,30 \text{ kg}$$

$$T = 25^\circ \rightarrow \rho_{\text{água}} = 997,61 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Vol. balde} = \text{máguas} / \rho_{\text{água}} = 11,30 / 997,61 = 0,0113 \text{ m}^3$$

$$P1 = 15,95 \text{ kg} \rightarrow \rho_1 = 15,95 / 0,0113 = 1411,504 \text{ kg/m}^3$$

$$P2 = 16,10 \text{ kg} \rightarrow \rho_2 = 16,10 / 0,0113 = 1424,779 \text{ kg/m}^3$$

$$P3 = 16,05 \text{ kg} \rightarrow \rho_3 = 16,05 / 0,0113 = 1420,854 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Media} = 1418,879 \times 1,01 = 1433,068 \text{ kg/m}^3$$

$$\times 0,99 = 1420,170 \text{ kg/m}^3$$

APENDICE B- Dosagem do concreto – Método ABCP

Considerações de projeto:

Ambiente urbano – agressividade moderada – classe II → $a/c \leq 0,60$

Controle rigoroso $S_d = 4,0$

A resistência desejada $25 \text{ Mpa} \leq F_{ck} \leq 30 \text{ Mpa}$

$F_{cj} = 25 + 1,65 \times 4,0 = 31,7 \text{ Mpa}$

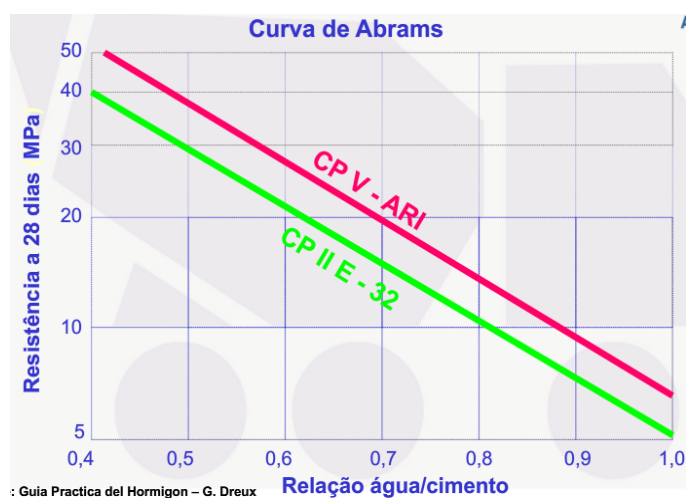
$F_{cj} = 30 + 1,65 \times 4,0 = 36,6 \text{ Mpa}$

1 – Fator a/c

Curva de Abrams Cimento CP V ARI (Figura 59)

$0,51 \leq a/c \leq 0,55$

Figura 55 - Curva de Abrams Cimento CP V ARI



Fonte: ABESC

3 – Volume de água e ar

Para brita $\varnothing 19 \text{ mm}$ e Adensamento manual → Volume de água 213 l/m^3

Slump 10- 15 cm

Var = 2%

Tabela 17- Volume de água por m³ de concreto

DIÂMETRO MÁXIMO BRITA (mm)	ADENSAMENTO	ADENSAMENTO	ADENSAMENTO	PORCENTAGEM APROXIMADA DE AR EXISTENTE NO CONCRETO
	MANUAL	VIBRATÓRIO MODERADO	VIBRATÓRIO ENERGÉTICO	
	SLUMP 10-15 CM	SLUMP 5-10 CM	SLUMP 0-5 CM	
9,5	242	228	208	3
19	213	203	183	2
25	203	193	178	1,5
38	188	178	163	1
50	178	168	153	0,5

Fonte: Rodrigues, 1998

3 – Cimento

 $X = a/c$ $0,51 = 213 / C$ $C = 417,6 \text{ kg}$ $V_{\text{cim}} = 417,6 / 3,04 = 137,37 \text{ l}$

4 – Agregado

 $V_{\text{concreto}} = V_{\text{cim}} + V_{\text{agregado}} + V_{\text{agua}} + V_{\text{ar}}$ Para 1m³ $1000 = 137,37 + V_{\text{agreg.}} + 213 + 20$ $V_{\text{agreg.}} = 629,63 \text{ l}$ Para Ø 19 mm e MF = 1,88 → $V_{\text{aparente brita}} = 650 \text{ l/m}^3$ (Tabela 2)Tabela 18 - Volume Aparente do Agregado Compacto Seco por m³ de Concreto

DIÂMETRO MAXIMO BRITA (mm)	MODULO DE FINURA DA AREIA			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,46	0,44	0,42	0,40
19	0,65	0,63	0,61	0,51
25	0,70	0,68	0,66	0,64
38	0,76	0,74	0,72	0,70
50	0,79	0,77	0,72	0,73

Fonte: Rodrigues, 1998

5 – Brita

$$MU = M_{\text{brita}} / V_{\text{aparente}}$$

$$M_{\text{brita}} = MU \times V_{\text{aparente}} = 1,39 \times 650 = 903,5 \text{ kg}$$

$$V_{\text{abs. Brita}} = M_{\text{brita}} / \delta_{\text{brita}} = 903,5 / 2,743 = 329,38 \text{ l}$$

6 – Areia

$$V_{\text{areia}} = V_{\text{greg}} - V_{\text{brita}}$$

$$V_{\text{areia}} = 629,63 - 329,38 = 300,25 \text{ l}$$

$$M_{\text{areia}} = V_{\text{areia}} \times \delta_{\text{areia}} = 300,25 \times 2,38 = 714,60 \text{ kg}$$

7 – Granulometria (areia / agregado total)

$$a/m = 714,6 / (714,6 + 903,5) = 0,44 \text{ (44\% areia)}$$

8 – Fluidez

$$A\% = P_{\text{água}} / P_{\text{cimento}} + P_{\text{agregados}}$$

$$A\% = 213 / (417,6 + 714,6 + 903,5)$$

$$A\% = 10,46\%$$

$$\text{Mistura Plástica } 8\% < A\% < 11\%$$

8 – Traço

$$\text{Cimento : Areia : Brita : água}$$

$$417,6 : 714,6 : 903,5 : 213 \text{ (} \div 417,6 \text{)}$$

$$\mathbf{1 : 1,71 : 2,164 : 0,51}$$

$$\text{Ajuste de água } a/c = 0,55 \rightarrow a = 229,68 \text{ l}$$

$$A\% = 229,68 / (417,6 + 714,6 + 903,5)$$

$$A\% = 11,28\% \text{ (Fluido)}$$

APÊNDICE C – Análises do concreto endurecido

Tabela 19 - Resultados das Tensões de Compressão Axial e Módulo de Elasticidade das misturas

Mistura	7 dias				28 dias			
	F _{cj} (MPa)	f _{cm}	E (GPa)	Desvio	F _{cj} (MPa)	f _{cm}	E (GPa)	Desvio
0	37,592	35,798	33,506	1,041	39,655	41.263	35,972	1,033
	35,103				41,075			
	35,383				42,291			
	35,116				42,030			
10%	34,473	35,235	33,241	1,251	38,242	39,652	35,263	1,956
	36,173				38,324			
	36,695				39,044			
	33,601				42,997			
20%	36,548	34,143	32,722	1,493	41,533	42,082	36,328	1,446
	33,989				43,042			
	33,556				43,755			
	32,480				39,999			
30%	36,918	35,829	33,520	1,173	41,890	42,442	36,483	0,691
	36,262				43,207			
	36,286				41,629			
	33,849				43,042			
40%	39,209	37,433	34,262	1,359	46,441	46,069	38,009	1,649
	37,955				46,155			
	37,096				43,532			
	35,472				48,141			
50%	39,063	37,469	34,279	2,237	44,124	43,968	37,133	2,059
	33,754				40,565			
	37,682				45,798			
	39,375				45,385			

A Tensão de Tração é dada pela fórmula

$F_{cd} = 2 \cdot F / \pi \cdot D \cdot L$ onde:

F → Força máxima de Compressão diametral

F_{cdi} → Tensão de compressão diametral (tração)

Fcdm → Tensão de compressão diametral (Tração) media

D → Diâmetro do corpo de prova

L → comprimento do Cp

Tabela 20- Resultados das Tensões por compressão diametral das misturas

Mistura	7 dias				28 dias			
	Fcj (KN)	Fcdi (MPa)	Fcdm (MPa)	Desvio	Fcj (KN)	Fcdi	Fcdm	Desvio
0	99,00	3,151	3,131	0,288	103,200	3,285	3,507	0,342
	90,300	2,874			96,000	3,056		
	91,250	2,905			120,600	3,839		
	112,900	3,594			120,950	3,850		
10%	89,100	2,836	2,936	0,089	122,200	3,890	3,728	0,157
	89,950	2,863			109,250	3,477		
	94,000	2,992			119,600	3,807		
	95,950	3,054			117,500	3,740		
20%	85,250	2,713	3,004	0,224	113,40	3,610	3,589	0,268
	95,300	3,035			126,00	4,011		
	92,050	2,930			108,20	3,444		
	104,850	3,337			109,45	3,293		
30%	96,100	3,059	3,098	0,274	116,300	3,702	3,672	0,160
	83,950	2,672			107,200	3,412		
	102,85	3,274			117,250	3,732		
	106,45	3,388			120,750	3,844		
40%	98,300	3,129	3,213	0,134	136,95	4,359	3,986	0,288
	98,150	3,124			123,35	3,926		
	99,150	3,156			112,00	3,565		
	108,200	3,444			128,60	4,093		
50%	107,800	3,431	3,333	0,200	127,55	4,060	3,875	0,194
	94,650	3,013			114,20	3,635		
	104,800	3,336			117,30	3,734		
	111,600	3,552			128,00	4,074		

O cálculo da absorção por imersão, índice de vazios e massa específica das misturas do concreto são feitos pelas fórmulas conforme Norma ABNT

$$\text{Absorção por imersão: } A\% = \frac{msat - ms}{ms} \times 100$$

$$\text{Índice de vazios: } Iv = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100$$

$$\text{Massa Específica Seca } \rho_s = \frac{ms}{msat - mi}$$

$$\text{Massa Específica Saturada: } \rho_{sat} = \frac{msat}{msat - mi}$$

$$\text{Massa Específica Real: } \rho_r = \frac{ms}{ms - mi}$$

Onde: msat = massa saturada seca

mi = massa imersa em água

ms = massa seca em estufa

Tabela 21 - Resultados obtidos da análise de absorção por imersão em água

Mistura	Corpo De Prova	Massa Seca em Estufa 72h (g)	Massa imersa em água g	Massa Saturada g	Absorção Por imersão %	Índice de vazios %	Massa Especifica amostra seca g/cm ³	Massa Especifica Amostra Saturada g/cm ³	Massa Espec. Real g/cm ³
M0	1	3559,33	2158,02	3748,63	5,32	11,90	2,24	2,36	2,54
	2	3535,80	2133,68	3718,80	5,18	11,69	2,24	2,35	2,52
M10	1	3478,20	2097,53	3661,17	5,26	11,70	2,22	2,34	2,52
	2	3478,60	2106,04	3667,37	5,43	12,09	2,23	2,35	2,53
M20	1	3573,54	2169,02	3733,35	4,47	10,22	2,28	2,39	2,54
	2	3595,56	2185,42	3766,80	4,76	10,83	2,27	2,38	2,55
M30	1	3561,20	2150,18	3728,97	4,71	10,63	2,26	2,36	2,53
	2	3545,09	2146,78	3717,78	4,87	10,99	2,26	2,36	2,53
M40	1	3613,81	2192,89	3763,56	4,144	9,53	2,30	2,39	2,54
	2	3601,83	2190,27	3767,18	4,591	10,49	2,28	2,39	2,55
M50	1	3588,33	2169,17	3748,02	4,45	10,91	2,27	2,37	2,53
	2	3599,37	2184,23	3763,37	4,56	10,38	2,28	2,38	2,54

APÊNDICE D - Teste da mistura do concreto com 100% do Pó de Exaustão

A mistura com 100% do Pó de Exaustão não apresentou coesão entre as partículas (Figura 55), com baixa trabalhabilidade e abatimento (Slump) igual a zero (Figura 56)

Figura 56 - Amostra da mistura de concreto com 100% do Pó de Exaustão



Fonte: Autor

Figura 57 - Abatimento da mistura com 100% do pó de Exaustão



Fonte: Autor

Os corpos de prova moldados e aos 28 dias (Figura 57) se apresentaram bastante porosos obtendo baixa resistência à compressão axial (Figura 58). A média de resistência obtida foi de 9 MPa.

Figura 58 - Amostra de Cps com 100% do Pó de Exaustão



Fonte: Autor



Figura 59 – Cps com rompimento axial



Fonte: Autor

ANEXO A – Dados do cimento

Dados do cimento CP V ARI da marca Campeão fornecida pelo fabricante.

FABRICA: ARCOS MARCA: CAMPEÃO CRH BRASIL BOLETIM DE ANÁLISES DE CIMENTO DC-35		CPVARI (NBR 5733/Jul.91) ENSACADO / GRANEL 01/01/2016 a 01/03/2016			
ENSAIOS QUÍMICOS					
ENSAIOS	NBR Nº	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 5733/91	
Perda ao Fogo - PF	NM18/04	%	2,92	≤ 4,5	
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	NM16/04	%	3,74	≤ 4,5	
Oxido de Magnésio - MgO	14656/01	%	1,58	≤ 6,5	
Resíduo Insolúvel - RI	NM15/04	%	0,65	≤ 1,0	
Oxido de Cálcio Livre - CaO(Livre)	NM11/04	%	1,05	não aplicável	
*Anidrido Carbônico - CO ₂	NM20/04	%	1,69	≤ 3,0	
ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS					
ENSAIOS	NBR Nº	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 5733/91	
Área Específica (Blaine)	NM26/98	cm ² /g	5200	≥ 3000	
Massa Específica	NM23/01	g/cm ³	3,04	não aplicável	
Densidade Aparente	-	g/cm ³	-	não aplicável	
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)	11579/91	%	1,0	≤ 6,0	
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)	12026/93	%	2,5	não aplicável	
Água da Pasta de Consistência Normal	NM43/03	%	31,2	não aplicável	
Início de Pega	NM65/03	h:min	2:15	≥ 1:00	
Fim de Pega	NM65/03	h:min	3:10	≤ 10:00	
Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente	11582/91	mm	0,00	≤ 5	
RESISTENCIA A COMPRESSÃO (MPa) - NBR 7215/96					
Idade (Dias)	Média	Desvio	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 11578/91		
1	29,8	1,15	≥ 14,0 Mpa		
3	39,6	1,29	≥ 24,0 Mpa		
7	43,2	1,03	≥ 34,0 Mpa		
28	50,0	0,62	não aplicável		
Observações: *Laudo da ACSP					
RESPONSÁVEL TÉCNICO					
					
Ana Caneschi					
ART - CRQ-02302541			Roberto Lopes Gerente Geral - Fábrica Arcos		
Atualizado em: 04/03/2016					