UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – UNIJUÍ

GEANNINA TEREZINHA DOS SANTOS LIMA

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA E MICROESTRUTURA EM CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA NATURAL POR AREIA DE FUNDIÇÃO

Ijuí

2014

GEANNINA TEREZINHA DOS SANTOS LIMA

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA E MICROESTRUTURA EM CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA NATURAL POR AREIA DE FUNDIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Diorges Carlos Lopes

Ijuí

2014

GEANNINA TEREZINHA DOS SANTOS LIMA

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA E MICROESTRUTURA EM CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA NATURAL POR AREIA DE FUNDIÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelos membros da banca examinadora.

Ijuí, 11 de dezembro de 2014

Prof. Diorges Carlos Lopes

Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria - Orientador

Prof. Cristina Eliza Pozzobon

Coordenadora do Curso de Engenharia Civil/UNIJUÍ

BANCA EXAMINADORA

Prof. Cristina Eliza Pozzobon (UNIJUÍ)

Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Diorges Carlos Lopes

Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria - Orientador

Aos meus pais, Artur Lima e Elenita Lima,

por estarem ao meu lado nos momentos difíceis,

pelo carinho, compreensão ,motivação e exemplo de vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por sempre me manter firme e forte, guiando meus passos para a concretização dos meus sonhos e objetivos.

Ao meu pai, Artur Darlan de Oliveira Lima *"in memorian"*, que sempre esteve ao meu lado, sendo minha força, minha luz, inspiração, me mandando sempre energias positivas, vindo até a mim através de sonhos para me enviar palavras e gestos de conselhos. A você pai, todo o amor desse mundo, e obrigada por se fazer tão presente em minha vida.

A minha mãe, Elenita dos Santos Lima, meu porto seguro, aquela que me deu a vida, responsável pelos puxões de orelha, que sentiu de perto minhas preocupações e insônias, que com o seu apoio em todos os momentos, me deu um combustível maior para nunca desistir, a senhora mãe, meu amor incondicional.

A minha avó Olinda dos Santos, meu irmão Jefferson Lima, aos meus sobrinhos Leonardo Barbosa Lima e Arthur Barbosa Lima, e aos demais familiares, pelos sorrisos, brincadeiras, pela palavra amiga, do fundo do meu coração este agradecimento, sem vocês não teria a menor graça.

Ao professor Diorges Carlos Lopes, como o mesmo gosta de falar "padrasto-pai deste trabalho", agradeço pelas horas de dedicação, pelos conselhos, confiança depositada e amizade.

A professora Mestre Cristina Eliza Pozzobon, por ter sido a "mãezona" durante toda a graduação, por inúmeras vezes ter me aconselhado e ter dito palavras de apoio, por ser esse grande exemplo de profissional a seguir.

Ao professor Boris Sokolovicz, por ter tirado tempo da sua agenda corrida, até mesmo de madrugada, para proporcionar sua ajuda, filosofar, argumentar e a ensinar a analisar os resultados de microscopia, meu agradecimento especial.

Aos laboratoristas e amigos do LEC Luis Donato, Tulio Ribeiro e Roberto Brandão, pelo auxílio durante o curso e pela realização dos ensaios, agradeço todo o apoio e amizade. A secretária do curso e grande amiga Cassiana Oliveira, a quem tanto me ajudou durante toda essa jornada.

Aos meus pupilos queridos, Cristiane dos Santos, Gabriela Blatt e Pedro Goecks, que bailaram literalmente comigo nos slump test, que toda manhã me proporcionavam risadas e viveram minhas angústias deste trabalho. A vocês meus queridos amigos, agradeço a Deus por ter tê-los como colegas de pesquisa, para mim, nosso grupo sempre será o melhor, principalmente para dançar Funk.

Aos meus colegas e amigos, em especial a Emmanuelle, Geisiele, Jessica, Gilnei, Maurício e Cristiano por todas as ligações de madrugada, semanas sem dormi, pelas idas e vindas de plotagem de projetos e por esses 5 anos de loucuras da Engenharia Civil, que com a companhia de vocês, tudo valeu a pena.

Aos amigos e colegas do Grupo PET, obrigada pela paciência, pelo abraço, pela mão que sempre se estendia quando eu precisava, pelos sorrisos de todos os dias, pela troca de diálogo e conhecimento em diversas disciplinas. Em especial a aqueles que já passaram por este programa de pesquisa, que hoje são profissionais, mestres da Engenharia, cada um de vocês, deixou um ensinamento e aprendizado e contribuiu para a minha formação acadêmica e humana.

A minha amiga e irmã Marília Martins, por muitas vezes me tirar do sério, porém, para mim um exemplo de ser humano, estando presente nos momentos mais alegres da minha vida e nos momentos mais difíceis as suas palavras foram o conforto para minha dor.

Aos amigos e colegas de formatura da Turma 2º/2014, que convivem comigo a nostalgia, adrenalina e alegria, do nosso último ano nesta universidade.

A Pedreira Paim pela doação dos agregados e o Laboratório de Engenharia Civil pela doação do cimento.

A FUNDIMISA, empresa responsável pela doação da areia de fundição. A química Carla Liana Ribas responsável pela parte ambiental da empresa, e aos amigos Jéssica Coelho, Neimar e Roberson, que colaboraram com explicações para entender os processos da fábrica que geram a areia de fundição.

Agradeço a todos os demais colegas, professores e funcionários do curso de Engenharia Civil pelo convívio ao longo do curso. Levarei todos para sempre em meu coração!

A vida é curta, mas as emoções que podemos

deixar duram uma eternidade.

Clarisse Lispector

RESUMO

LIMA, G. T.S. **Análise de resistência e microestrutura em concretos com substituição parcial de areia natural por areia de fundição.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Ijuí, 2014.

A produção de fundidos, que são materiais produzidos através de ligas ferrosas (aço e ferro fundido) e não ferrosas (alumínio, cobre, zinco, magnésio entre outros), vem crescendo gradativamente ao longo dos anos (BITENCOURT, 2006), isso significa, também, o aumento de resíduos gerados por este processo. A areia é utilizada em todos os processos de fundição para fabricação de moldes, ela é responsável por dar forma ao metal. Logo após as peças metálicas serem desmoldadas, a areia utilizada sai do sistema como resíduo de fundição. Quando não é possível reaproveitar esta areia, é necessário depositá-la em aterro industrial, o qual, quando não monitorado, gera sérios problemas ambientais, além de acarretar alto custo para a empresa, pois os órgãos e regulamentos ambientais levam a destinar seus resíduos em aterros cada vez mais distantes do local gerado. Até pouco tempo atrás, essa era a única maneira encontrada pelas empresas para dar destinação a esses resíduos, porém, com emprego de tecnologia e estudos de pesquisadores, a indústria da construção civil apresenta-se, com grande potencial na solução de problemas no descarte dos resíduos gerados, através da incorporação dos materiais de construção, possibilitando assim, a redução dos custos e a diminuição da deposição de resíduos no meio ambiente. Levando em consideração esses fatos, a substituição de parte da areia natural por areia de fundição em concretos pode vir a diminuir o custo da produção dos mesmos, e também vir a melhorar algumas de suas propriedades físicas mecânicas. Através da dosagem pelo método da ABCP, foi analisada a influência da substituição da areia natural por areia de fundição gerada nos processos de macharia e quebra de canal em teores, de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%,30% e 50% avaliando assim, suas propriedades de resistência à compressão aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias, e ainda investigando sua estrutura interna, ou seja, a microestrutura do concreto, bem como a composição química da mistura. Com os resultados obtidos, verificou-se que a areia de fundição gerada tanto nos processos de macharia como também de quebra de canal trouxeram maiores ganhos de resistência em todos os dias de ruptura estabelecidos pela norma, se comparado ao traço moldado somente com areia natural. Dessa forma, verifica-se que a substituição parcial da areia natural por

areia de fundição no concreto contribui para o aumento de resistência deste, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável, reutilizando este resíduo industrial e diminuindo o consumo de matérias primas na produção.

Palavras-chave: Areia de fundição; Material alternativo; Resíduos industriais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Areia antes do processo 26
Figura 2- Areia depois do processo 26
Figura 3- Geração de resíduo sólido industrial Classe I por setor industrial 34
Figura 4- Destinação dos resíduos sólidos industriais Classe I 35
Figura 5- Geração de resíduo sólido industrial Classe II por setor industrial 35
Figura 6- Destinação dos resíduos sólidos industriais Classe II 36
Figura 7- Resíduos gerados na Construção Civil 38
Figura 8- Resíduos gerados na Construção Civil na execução de um edifício 38
Figura 9- Caracterização física do cimento 45
Figura 10- Aspecto visual do agregado miúdo natural 46
Figura 11- Areia de Fundição no processo de macharia 47
Figura 12- Areia de fundição no processo de quebra de canal 48
Figura 13- Granulometria dos agregados miúdos 50
Figura 14- Granulometria do agregado graúdo 51
Figura 15- Materiais utilizados para moldagem 54
Figura 16- Slump Test 54
Figura 17- Moldagem dos corpos de prova 56
Figura 18- Ensaio de resistência à compressão axial 57
Figura 19- Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) 58
Figura 20- Resistência à compressão aos 3 dias - Areia de Macharia 60
Figura 21- Resistência à compressão aos 7 dias - Areia de Macharia 61
Figura 22- Resistência à compressão aos 14 dias - Areia de Macharia 61
Figura 23- Resistência à compressão aos 21 dias - Areia de Macharia 62
Figura 24- Resistência à compressão aos 28 dias - Areia de Macharia 63
Figura 25- Resistência à compressão aos 3 dias - Areia Quebra de Canal 65
Figura 26- Resistência à compressão aos 7 dias - Areia Quebra de Canal 65
Figura 27- Resistência à compressão aos 14 dias - Areia Quebra de Canal 66
Figura 28- Resistência à compressão aos 21 dias - Areia Quebra de Canal 67

Figura 29- Resistência à compressão aos 28 dias - Areia Quebra de Canal..... 68
Figura 30- Ensaio lixiviação para o traço AM50 70
Figura 31- Ensaio lixiviação para o traço AQC50 70
Figura 32- Microscopia do concreto..... 71
Figura 33- Etringita no concreto..... 72
Figura 34- Etringida secundária 72
Figura 35- Microscopia do concreto - monossulfato..... 73
Figura 36- Microscopia do concreto – C-S-H 73
Figura 37- Microscopia do concreto – TR, 50 μm aos 28 dias 75
Figura 38- Microscopia do concreto – AM50, 50 μm..... 76
Figura 39- Microscopia do concreto – AQC50, 50 μm aos 28 dias 77
Figura 40- EDS traço de referência (TR) 77
Figura 41- EDS para a mistura AM50..... 78
Figura 42- EDS para a mistura AQC50..... 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Ranking dos países produtores de fundidos 29
Tabela 2- Geração de resíduos sólidos industriais no Brasil 33
Tabela 3- Quantidade de resíduos sólidos industriais gerados pela Classe I e Classe II... 34
Tabela 4- Composição química do cimento CP IV - 32 45
Tabela 5- Características físicas do cimento CP IV-32 46
Tabela 6- Características da areia natural 47
Tabela 7- Características da areia de fundição (Macharia) 49
Tabela 8- Caracterização da areia de fundição (Quebra de Canal) 49
Tabela 9- Características do agregado graúdo 51
Tabela 10- Resultados da resistência à compressão 63
Tabela 11- Resultados da resistência à compressão 68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Tipos de cimento Portland e suas composições 18
Quadro 2- Classificação do agregado miúdo 21
Quadro 3- Divisão das britas de acordo com o tamanho das partículas 22
Quadro 4- Consumo de materiais por traço para a substituição de areia natural por areia de fundição (Macharia)..... 52
Quadro 5- Consumo de materiais por traço para a substituição de areia natural por areia de fundição 53
Quadro 6- Valores do abatimento do tronco de cone (Slump Test) e fator a/c final para a substituição de areia natural por areia de fundição (Macharia) no concreto 55
Quadro 7- Valores do abatimento do tronco de cone (Slump Test) e fator a/c final para a substituição de areia natural por areia de fundição (Quebra de Canal) no concreto 55

LISTA DE SIGLAS

ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem

ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos

ABNT – Associação de Normas Técnicas

ADF – Areia Descartada de Fundição

AFIFA – Associação Brasileira de Fundição

a/g - Relação água/aglomerante em massa

Al_2O_3 – Alumina

CaO – Cal

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CCP – Concreto de Cimento Portland

CEMA – Conselho Estadual de Meio Ambiente

CETESB – Companhia de Tecnologia do Estado de São Paulo

Fe_2O_3 – Oxido de ferro

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental

FIHP – Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado

MPa: Megapascal

SiO_2 – Sílica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16

2.1 Concreto 16

2.1.1 Conceito e característica do concreto de cimento Portland (CCP) 16

2.1.2 Materiais constituintes 17

2.1.3 Microestrutura e resistência do concreto 22

2.2 Areia de fundição 23

2.2.1 Indústria de fundição 29

2.2.2 O Processo de fundição 30

2.2.3 Resíduos sólidos 32

2.3 Sustentabilidade 36

2.3.1 Sustentabilidade na construção civil 37

2.3.2 Substituição de matérias primas naturais por Areia Descartada de Fundição (ADF) 39

3. METODOLOGIA 43

3.1 Classificação da pesquisa 43

3.2 Planejamento da pesquisa 43

3.3 Materiais utilizados 44

3.3.2 Agregado miúdo 46

3.3.3 Agregado Graúdo 50

3.4 Dosagem dos traços 52

3.4 Ensaio de resistência a compressão 56

3.5 Ensaio de microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 57

3.6 Ensaio de lixiviação 58

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 60

4.1 Resistência à compressão - concreto com substituição de areia natural por areia de fundição (macharia)..... 60

4.1.1 Evolução das resistências 63

4.2 Resistência à compressão - concreto com substituição de areia natural por areia de fundição (quebra de canal) 64

4.2.1 Evolução das resistências 68

4.2 Lixiviação..... 69

4.3 Discussão do ensaio da Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 71

4.3.1 Resultados das análises da microscopia eletrônica de varredura (MEV) 74

5. CONCLUSÃO..... 80

5.1 Quanto à resistência à compressão 80

5.2 Quanto a aparência dos corpos-de-prova e lixiviação das mistura AM50 e AQC50 80

5.3 Quanto à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 81

5.4 Sugestões para trabalhos futuros 82

REFERÊNCIAS 83

ANEXO A..... 88

ANEXO B 109

ANEXO C 114

1. INTRODUÇÃO

As areias tem amplo uso nas fundições, não somente na fabricação de moldes para o vazamento do metal, mas também para dar forma ao metal, ou seja, admitem uma perfeita sincronização entre a operação de moldagem e a de fusão do metal (COUTINHO, 2004). São utilizadas por diversas características, dentre elas se destaca o fato de serem consideradas de baixo custo, por conterem alta capacidade refratária e facilmente aglutinável quando misturados com argila e/ou compostos aditivos orgânicos e inorgânicos. Contudo, esta areia, após ser utilizada em processos da indústria de fundição, principalmente na etapa de desmoldagem das peças metálicas, tornam-se um grave problema ambiental, pois ficam contaminadas por elementos e compostos químicos, tais como: chumbo, fenóis, mercúrio, sódio, ferro, cloreto, fluoretos, bário, manganês, cobre, entre outros elementos.

No Brasil, a produção de fundidos, em 2008, ultrapassou os três milhões de toneladas, com a geração de, aproximadamente, uma tonelada de resíduo para cada tonelada de metal produzido (ABIFA, 2009). Com base nesses dados, conclui-se que o passivo ambiental das fundições no país é preocupante. Neste sentido, informações revelam que um dos maiores problemas do setor de fundição é a geração de resíduos sólidos, constituídos principalmente pelas denominadas areias residuais ou areias descartadas de fundição. O descarte adequado desses resíduos é um grande desafio para as empresas, pois estão cada vez mais conscientes da necessidade de preservar o meio ambiente, na busca do desenvolvimento sustentável a longo prazo.

Atualmente existem empresas que estão reutilizando as areias de fundição nos diferentes processos das fábricas, através da regeneração da areia, sendo uma alternativa técnica e economicamente viável. De acordo com Mariotto (2000), não se deve confundir regenerar com recuperar ou recircular. A recirculação da areia usada no próprio sistema que a gerou, requer, em geral, tratamentos tais como desagregação de grumos, remoção de poeiras e remoção de materiais metálicos que, em seu conjunto, constituem o que no Brasil denomina-se recuperação da areia usada. A regeneração de uma areia de fundição implica na limpeza superficial de seus grãos (destacamento das substâncias aderentes aos mesmos) e na remoção das partículas resultantes

dessa limpeza, com o objetivo de reconduzir a areia usada a uma condição semelhante à de uma areia nova, permitindo sua reutilização no processo sem detrimento das qualidades dos moldes ou machos produzidos.

Quando não é possível mais reaproveitar esta areia no processo de fundição, é necessário que os resíduos sejam depositados em aterros industriais, e quando esta areia é lançada inadequadamente ou o aterro não é monitorado corretamente, pode haver alteração das características físicas, químicas e biológicas do solo e da água, gerando um sério risco ambiental. Além disso, pode acarretar um problema adicional, pois os órgãos e regulamentos ambientais exigem que as empresas destinem seus resíduos em aterros cada vez mais distantes do local gerado, aumentando consideravelmente os custos envolvidos.

Diante deste contexto, considerando o avanço da tecnologia e diversos estudos já realizados em grandes universidades, empresas nacionais e internacionais vêm realizando pesquisas com a finalidade de buscar um destino mais adequado e correto para este resíduo. Estas pesquisas estão relacionadas à reutilização de areia de fundição, tais como: na produção de blocos e pisos de concreto, base e sub-base nas camadas da pavimentação, substituição do agregado fino na composição do concreto asfáltico (CBUQ) e na fabricação de concreto. Destas pesquisas, vale resaltar que a maioria obteve resultados significativos; um exemplo estudado foi à substituição de insumos naturais por areia de fundição na confecção de blocos de concreto, onde as propriedades físicas e mecânicas do mesmo alcançaram um resultado superior ao bloco com matérias primas naturais (LIMA, et al 2014).

Pensando na preservação ambiental, sustentabilidade, e economia da matéria prima, o presente trabalho buscou, através do tema de novos materiais e novas tecnologias aplicadas a construção civil, avaliar as propriedades do concreto com substituição parcial de areia natural por areia de fundição.

O trabalho teve como objetivo analisar, através da metodologia de dosagem da ABCP, a influência da areia de fundição originada no processo de macharia e quebra de canal para a resistência do concreto, quando substituiu a areia natural sob teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 50%. Além das propriedades mecânicas (resistência à compressão axial), foram analisadas a microestrutura e a lixiviação da mistura em relação a um concreto referência

moldado somente com areia natural, nas idades de 3,7,14,21 e 28 dias, a fim de proporcionar uma solução para a reutilização desse resíduo industrial.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial para todos os traços, ensaios de microscopia eletrônica de varredura e lixiviação para a mistura de 50% , com a finalidade de observar os desempenhos das variáveis relacionadas com a resistência mecânica e de microestrutura do concreto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto

Segundo a Revista Concreto e Construções (2009), na qual foi realizada pelo Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, o concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, amplamente disseminado e o principal componente das estruturas. Após seu endurecimento, atua junto com as armaduras na constituição de pilares, vigas, lajes e escadas. De acordo com a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado - FIHP (2009) estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, isso gera aproximadamente, um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. No Brasil segundo a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem - ABESC foram consumidos em torno de 30 milhões de metros cúbicos de concreto.

O concreto é um material composto constituído por mistura de um aglomerante (formado por cimento e água), na qual são adicionados no concreto partículas ou fragmentos de agregados. Ressalta-se que pelo menos 75% do volume do concreto são ocupado pelos agregados, deste modo, os agregados possuem grande importância na formação e desenvolvimento do concreto. Quando misturado, deve oferecer condições de plasticidade que facilitem as operações de manuseio indispensáveis ao lançamento nas formas, adquirindo com o tempo, pelas reações que então se processarem entre aglomerante e água, coesão e resistência (METHA, 1994).

2.1.1 Conceito e característica do concreto de cimento Portland (CCP)

Segundo Helene et al. (2010), o concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade. Mesmo sendo o mais recente dos materiais de construção de estruturas, pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida.

> O concreto de cimento Portland deve conter cimento, água e agregados, além da possibilidade de contar com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, cujos empregos tornam-se cada vez mais frequentes nos concretos atuais. A proporção entre os diversos constituintes é buscada pela tecnologia do concreto, para atender simultaneamente as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade requeridas para o concreto, além das características de trabalhabilidade necessárias para o

> transporte, lançamento e adensamento, condições estas que variam caso a caso. (HELENE et al, 2010,p. 920).

Basicamente o cimento e a água são os elementos ligantes do concreto, e os agregados por serem considerados materiais inertes. Segundo Andolfato (2002) apud Jacques (2013) , as propriedades ligantes da pasta de concreto são produzidas através de reações químicas envolvendo o cimento e a água, o autor alega que a quantidade de água necessária para a realização das reações é pequena, mas devido ao fato de o concreto necessitar ter trabalhabilidade, é utilizada uma quantidade maior de água para a fabricação do mesmo, o que vai alterar as propriedades mecânicas do concreto, como por exemplo, a sua resistência, por isso se faz necessário adotar uma proporção adequada de água e cimento para se ter garantia da resistência adequada do concreto.

2.1.2 Materiais constituintes

A) Cimento Portland

Segundo Bauer (2000), o cimento Portland é o produto obtido pela pulverização de clinker, sendo um material de origem mineral, e constituído basicamente de silicatos hidráulicos de cálcio, com certa proporção de sulfato de cálcio natural derivado da moagem e mistura de rochas calcárias, todos esses elementos quando misturados com água tem propriedades aglomerantes.

De acordo com Foguessato (2007) apud Jacques (2013), o cimento Portland possui em sua composição alguns componentes essenciais que são cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), chegando a quase 95% do total na análise de óxidos.

A finura é uma propriedade do cimento Portland na qual se destaca, tendo um papel fundamental na qualidade do concreto, ela é responsável pela velocidade da reação de hidratação do cimento (JACQUES, 2013). Segundo Bauer (2000) o aumento da finura melhora a resistência, particularmente a resistência da primeira idade, diminui a exsudação e outros tipos de segregação, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão dos concretos e diminui a expansão em autoclave.

O Quadro 1 tem como objetivo apresentar os tipos de cimento Portland, bem como suas composições.

Quadro 1- Tipos de cimento Portland e suas composições

Cimento	**Tipo**	**Clínquer + Gesso(%)**	**Escória Siderúrgica (%)**	**Material Pozolânico(%)**	**Calcário (%)**
CP I	Comum	100	-	-	-
CP I – S	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II – E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II – Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II – F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V – ARI	Alta Resistência Inicial	95-100	-	-	0-5

Fonte: Bauer (2000)

Conforme a Revista Concreto e Construções (2009):

- **Cimento Portland Comum (CP I):** É usado para controlar a pega (o tempo necessário para o endurecimento parcial do composto). É recomendado para o uso em construções de concreto em geral, quando não são exigidas propriedades especiais do cimento.

- **Cimento Portland Composto (CP II):** Atende plenamente às necessidades da maioria das aplicações usuais, apresentando, em muitos casos, vantagens adicionais.

- **Cimento Portland de Alto -Forno (CP III):** Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, baixo calor de hidratação e alta resistência à expansão e a sulfatos (reações álcali-agregado), este cimento é vantajoso em obras de concretomassa, tais como a construção de barragens.

- **Cimento Portland Pozolânico (CP IV):** Recomendado para obras expostas à ação de água corrente e para ambientes agressivos por suas propriedades de baixa permeabilidade, alta durabilidade, alta resistência à compressão a idades avançadas.

- **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI)** Atinge altas resistências nos primeiros dias de aplicação, é usado na fabricação de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, de tubos, lajes, meio-fio, mourões, postos e de elementos arquitetônicos pré-moldados, que necessitam de um cimento de elevada resistência inicial para a rápida desforma.

B) Agregados minerais

De acordo com o Ministério de Minas e Energias, os agregados são matérias granulares, sem volume definidos, tais como: a pedra britada, o cascalho e as areias naturais, na qual devem possuir dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia civil.

> O agregado é o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos. O termo agregado é de uso generalizado na tecnologia do concreto, nos outros ramos da construção, conforme cada caso, pelo nome especifico: fíler, pedra britada, bica- corrida, rachão (BAUER, 2000, p 63).

Conforme Mehta et al. (1994), cerca de 90% dos agregados usados em CCP são de origem mineral, considerando assim materiais de baixo custo, não entram em reações químicas complexas com a água, deste modo os agregados são tratados como enchimento inerte ao concreto.

A porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão, modulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias são características dos agregados que devem ser levadas em consideração no processo de fabricação do CCP. Bauer (2000) recomenda que no processo de fabricação do CCP, devem-se excluir agregados oriundos de rochas macias, ou de baixa resistência à compressão, bem como, utilizar materiais que prejudiquem a sua aderência à argamassa ou que venham a interferir na pega e no endurecimento.

Segundo Helene (1992) e Bauer (2000), os agregados se classificam de acordo com:

a) Sua origem:

- Naturais: Agregados que estão em forma particulada na natureza, como: areia e cascalho;
- Industrializados: Agregados onde sua composição foi obtida por processos industriais, neste contexto, a matéria-prima pode ser: rocha, escória de alto forno.

b) Sua dimensão das partículas:

- Agregado Miúdo: são as areias;
- Agregado Graúdo: são os cascalhos e as britas.

Segundo Jacques (2013), a areia na construção civil é considerada como agregado miúdo, sendo a mesma um produto natural que tem origem da fragmentação das rochas devido a condicionantes ambientais, tais como erosão das rochas, ação dos ventos, ação da água.

De acordo com a NBR 7211 (2009), define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujo os grãos passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075 mm. Em

geral a areia possui diâmetro entre 0,06 e 2,0 mm. A seguir o Quadro 2, apresenta a classificação do agregado miúdo quanto à dimensão das partículas.

Quadro 2- Classificação do agregado miúdo

Tipo de areia	**Tamanho Nominal (mm)**		**Módulo de Finura (MF)**
	Mínima	**Máxima**	
Muito fina	0,15	0,6	MF < 2,0
Fina	0,6	1,2	2,0 < MF < 2,4
Média	1,2	2,4	2,4 < MF < 3,2
Grossa	2,4	4,8	MF > 3,2

Fonte: Bauer (2000) e NBR 7211

A NBR 7211(2009) estabelece uma definição de agregado graúdo, descreve que são pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8 mm. Conforme Bauer (2000), a pedra brita utilizada na composição final do concreto é um produto, obtido através de equipamentos de britagem de rochas , que são extraídas nas pedreiras, posteriormente as mesmas passam por peneiras que definem a forma e dimensões do agregado. O autor ainda relata que a pedra brita é dividida em faixas granulométricas de graduação de 0 a 4, e é encontrada no comércio com a denominação de pedrisco e pedras de 1 a 4. Sendo que a maior demanda por pedra brita ocorre no processo de fabricação de concreto, onde são empregados principalmente o pedrisco e as britas 1 e 2, sendo que para a execução de concreto ciclópico usa-se brita 4 e rachão.

O Quadro 3 apresenta a divisão das britas de acordo com o tamanho das partículas.

Quadro 3- Divisão das britas de acordo com o tamanho das partículas

Quadro 1: Pedra brita Numerada	**(NBR 7211/ NBR 7225)**		COMERCIAL	
	TAMANHO NOMINAL			
Nº	**Mínima**	**Máxima**	**Mínima**	**Máxima**
Brita 0			4,8	9,5
Brita 1	4,8	12,5	9,5	19,0
Brita 2	12,5	25,0	19,0	38,0
Brita 3	25,0	50,0	38,0	50,0
Brita 4	50,0	76,0	50,0	76,0
Brita 5	76,0	100,0		
Obs: para efeito de dosagem pode-se utilizar dmax= 25 mm para uma mistura de brita 1 + brita 2.			> 76 mm considerado pedra de mão	

Fonte: Duart (2009)

2.1.3 Microestrutura e resistência do concreto

Segundo Mehta et al. (1994), o termo macroestrutura é geralmente empregado para a estrutura grosseira, ou seja, visível à vista humana já o termo microestrutura é empregado para uma porção aumentada microscopicamente de uma macroestrutura. Analisando o concreto em nível microestrutural origina-se uma nova fase chamada de zona de transição, está é uma região interfacial entre a pasta e o agregado, Mehta et al. (1994), define como sendo uma película delgada com espessura de 10 a 50μm ao redor do agregado, geralmente um pouco mais fraca do que os outros dois componentes principais do concreto, exercendo uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico que pode ser esperado pela sua espessura.

De acordo Kelm (2011), a quantidade de água e a idade, são fatores importantes para o estudo da microestrutura da pasta de concreto. A pasta varia de acordo com a relação água/aglomerante em massa (a/ag) utilizada. Quando o cimento entra em contato com a água, os compostos se hidratam e preenchem os espaços originalmente ocupados pela água e este preenchimento é tanto maior quanto menor a relação água/aglomerante. Quanto à idade, as particularidades da microestrutura desenvolvem-se desde o contato do cimento com a água, pois já nas primeiras horas as mudanças são bastante rápidas.

Conforme Neville (1997), a resistência é considerada como a propriedade mais importante e também a mais analisada no concreto, este parâmetro geralmente é utilizado para controlar a qualidade do concreto

Mehta et al. (1994) definem a resistência de um material como a capacidade deste resistir à tensão sem ruptura. No concreto a resistência é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura e é sinônimo do grau de ruptura no qual a tensão aplicada alcança seu valor máximo. Para se realizar o ensaio de resistência são feitos corpos de provas, analisando sempre suas dimensões, geometrias e o estado de umidade, se houver alguma variação nos mesmos, pode vir alterar a resistência dos corpos de provas. Outros parâmetros podem interferir na variação de resistência que são: resistência das fases componentes, que depende da porosidade da matriz (relação água/cimento, aditivos minerais, grau de hidratação e teor de ar aprisionado e incorporado), porosidade do agregado, e porosidade da zona de transição (em função da relação água/cimento, aditivos minerais, características de exsudação, grau de compactação, grau de hidratação e a interação química entre agregado e pasta de cimento).

2.2 Areia de fundição

Segundo Soares (2000), as areias tem um amplo uso nas fundições, não só na fabricação de moldes para o vazamento do metal, mas como também dar a forma ao metal. São utilizadas por diversas características dentre elas se destaca por ser considerada de baixo custo, por conter alta capacidade refratária, facilmente aglutinável quando misturados com argila, compostos aditivos orgânicos e inorgânicos.

> Define-se areia de moldagem como o material que constitui o molde. É um sistema heterogêneo, constituído essencialmente de um elemento granular refratário, que constitui a base (geralmente areia silicosa) e um elemento aglomerante mineral (argila, cimento) ou orgânico (óleos, farinha de cereais, resinas). As areias de moldagem também chamadas de areia de fundição destinam-se à confecção de moldes e machos na fabricação de peças na qual as indústrias produzem (Lo Ré, 1978 apud Bonet, 2002).

De acordo com Bonet (2002), classificam-se segundo os critérios de constituição, como origem, uso, emprego na caixa de fundição e a qualidade do metal:

a) Quanto à origem, as areias podem ser:

- Areias Naturais: são originadas de arenitos de cimento argiloso ou de alteração de rochas feldspáticas (saibros), é usada diretamente na moldagem, sofrendo uma correção na umidade;
- Areias Semi-sintéticas: são resultantes das modificações introduzidas nas areias naturais, por meio de adição de substâncias visando melhorar suas qualidades;
- Areias Sintéticas: são obtidas pela mistura correta da areia-base e aglomerantes em proporção adequada e umidade determinada;

b) Quanto ao uso, podem ser:

- Areia nova: quando utilizada pela primeira vez na fundição;
- Areia usada: quando recuperada de fundições anteriores;

c) Quanto ao emprego na caixa de fundição, podem ser:

- Areia de faceamento: é a parte da areia que faceia o modelo e entra em contato com o metal de vazamento;
- Areia de enchimento: parte da areia que constitui o restante da caixa de moldagem;
- Areia de macho: aquela destinada ao preparo dos machos, conformadores das cavidades internas das peças;

d) Quanto ao estado de umidade da areia, podem ser:

• Areia úmida ou verde: mantém no momento do vazamento, aproximadamente a mesma umidade do preparo;

• Areia estufada: possuem composição adequada para macho e moldes e que sofrem cozimento em estufa antes do vazamento;

e) Quanto a qualidade do metal, podem ser:

• Areias para metais ferrosos (ferro de fundido cinzento, maleável e aço);

• Areia para metais não ferrosos (bronze e latão, cobre e níquel, alumínio , e magnésio).

O método de moldagem mais utilizado em todo mundo para a produção de peças fundidas é a moldagem em areia; estimando-se que mais de 80% das peças fundidas produzidas utilizam moldes feitos de areia aglomerada, sendo as areias aglomeradas com argila, em geral, as mais empregadas para confeccionar os moldes (ARMANGE , 2005).

As areais de moldagem são constituídas essencialmente de um elemento granular refratário (areia base) e um elemento aglomerante mineral (argila bentonita ou caulinita), água e aditivos (pó de carvão, amido de milho, dextrina) (MARIOTTO, 2001).

Conforme Scheunemann (2005), o principal resíduo gerado nas etapas de desmoldagem de peças metálicas no processo de fundição é a areia de fundição. Ela apresenta características quantitativas e qualitativas em função do tipo de tecnologia empregada nos processos utilizados. A Figura 1 e 2 apresenta a areia antes e depois do processo de fundição.

Figura 1- Areia antes do processo

Fonte: Site Albrecht (2013)

Figura 2- Areia depois do processo

Fonte: Site Albrecht (2013)

Segundo a NBR 10004 (2004), a areia de fundição, que é utilizada para confecção de moldes de peças metálicas, é classificada como resíduo não perigoso, porém, dependendo de cada situação ou processo, por apresentar alguns poluentes, tais como, metais (ferro, alumínio, níquel, cromo, chumbo, zinco, etc.) e resinas fenólicas, que podem afetar o ambiente quando destinado ou manuseado de forma inadequada.

A areia de moldagem corresponde ao maior volume de resíduos gerados pela Indústria de Fundição, com características quantitativas e qualitativas diferenciadas em função das peculiaridades de cada processo em particular. Depois de utilizada em moldes a areia fica contaminada por metais pesados, dependendo do material de fundição, e por resinas poliméricas empregadas na compactação (SCHEUNEMANN, 2005).

Segundo Lopes (2009), a areia base utilizada no processo de fundição é constituída de grãos de tamanhos entre 0,05 mm e 2 mm, que são peneirados para separação de acordo com seu tamanho. No Brasil essa areia base é retirada principalmente de leitos de rios.

As areias utilizadas para confecção dos moldes e machos podem ser extraídas de jazidas de cava ou de rios, sendo considerado um bem não renovável, cujo beneficiamento invariavelmente causa impactos ambientais. Para o preparo dos moldes, a areia recebe a adição de um ligante que tem a função de polimerização e representa a fusão de várias moléculas formando longas cadeias moleculares, ao polimerizar ocorre o endurecimento da areia formando um bloco sólido e quimicamente inerte com resistência mecânica e térmica (RAMPAZZO, 1989).

De acordo com Scheunemann (2005), a regeneração de areias de fundição é um tema exposto há mais de 40 anos, sendo aplicada nos diferentes processos em fundições de todo mundo. Esse método é uma alternativa técnica e economicamente viável, sendo considerada uma operação padrão na maioria das indústrias de fundição.

Segundo Peixoto (2003), não se deve confundir regenerar com recuperar ou recircular. A recirculação da areia usada no próprio sistema que a gerou, requer, em geral, tratamentos tais como desagregação de grumos, remoção de poeiras e remoção de materiais metálicos, que em seu conjunto constituem o que no Brasil denominamos recuperação da areia usada. A regeneração de uma areia de fundição implica a limpeza superficial de seus grãos (destacamento das substâncias aderentes aos mesmos) e remoção das partículas resultantes dessa limpeza, com o objetivo de

reconduzir a areia usada a uma condição semelhante à de uma areia nova, permitindo sua reutilização no processo sem detrimento das qualidades dos moldes ou machos produzidos.

De acordo com a definição anterior, uma areia é considerada regenerada quando pode substituir a areia nova em qualquer das situações em que se usa areia nova na fundição, isto é:

a) fabricação de machos (aglomeração com ligantes químicos);
b) fabricação de moldes com areia ligada quimicamente ou não ligada;
c) diluição do sistema de areia verde.

A regeneração de uma dada areia usada consiste em uma sequencia de tratamentos específicos ou operações unitárias. Portanto a regeneração deve compreender as seguintes etapas:

1ª etapa: desagregação de torrões e grumos, ou seja, liberação dos grãos individuais da areia, etapa sempre necessária; em muitos casos corresponde aproximadamente ao que se definiu anteriormente como recuperação.

2ª etapa: remoção dos resíduos metálicos, seja na forma de óxidos, seja na forma de gotas.

3ª etapa: limpeza superficial dos grãos, ou seja, remoção dos resíduos de aglomerantes, aditivos e seus produtos de decomposição aderidos aos grãos.

4ª etapa: classificação da areia regenerada, de modo a restabelecer a granulométrica desejada.

A existência da 3ª etapa no processamento da areia é que efetivamente distingue a regeneração da recuperação, sendo considerada a essência do processo de regeneração.

Segundo Tede (2009), quando não é possível mais reaproveitar está areia no processo de fundição, é necessário que os resíduos sejam depositados em um aterro industrial, e quando não monitorado, gera um sério problema ambiental, devido ao volume produzido, além disso, acarreta um problema adicional, pois os órgãos e regulamentos ambientais levam as empresas a destinar seus resíduos em aterros cada vez mais distantes do local gerado, aumentando consideravelmente os custos envolvidos.

2.2.1 Indústria de fundição

Segundo Bonet (2002), a indústria da fundição é conhecida como altamente poluidora, talvez, pelo fato de ser confundida com o setor siderúrgico, ou também pelo fato de em décadas anteriores, despejarem seus poluentes na atmosfera, através dos seus fornos de fusão. Atualmente, o grande problema das empresas de fundição são os seus resíduos sólidos, constituídos dos excedentes das areias usadas na confecção dos moldes e machos.

O setor produtor de peças fundidas em ferro, aço e ligas não ferrosas é um segmento da economia que emprega cerca de 47.200 trabalhadores, onde faturou 2,9 bilhões de dólares, em cerca de 1.200 empresas. Têm por característica principal o uso intenso de mão-de-obra e suas matérias-primas, todas de origem nacional, conferindo-lhes uma independência do mercado externo (BORRA, 2004). Logo, gera um número significativo de empregos diretos e indiretos na cadeia produtiva de fundição.

De acordo com a Associação Brasileira de Fundição – ABIFA (2009), o Brasil é o 7º produtor de fundidos no cenário mundial, superando países como França, Coréia e Itália por exemplo. As condições naturais do Brasil mostram toda uma potencialidade do setor para se tornar um dos maiores produtores mundiais. Na Tabela 1 é apresentado o ranking dos países produtores de fundidos.

Tabela 1- Ranking dos países produtores de fundidos

COLOCAÇÃO	PAÍS	TONELADAS	%
1º	China	35.300.000	45
2º	Índia	7.443.200	9
3º	Estados Unidos	7.408.071	9
4º	Japão	4.385.998	6
5º	Rússia	4.200.000	5
6º	Alemanha	3.901.665	5
7º	Brasil	2.296.916	3
8º	Coreia	2.135.000	3
9º	França	1.736.704	2
10º	Itália	1.668.802	2
11º	México	1.485.324	2
TOTAL		79.153.012	100

Fonte: ABIFA (2009)

Segundo ABIFA, o desenvolvimento apontado nos últimos anos deve-se, em grande parte, à crescente participação do setor automotivo (55%) na distribuição setorial de vendas de fundidos do Brasil.

2.2.2 O Processo de fundição

Segundo Gossen (2005)**,** o processo de fundição começa com a preparação da areia de modelagem para realizar a confecção dos moldes, logo após, derrama-se o metal líquido nos moldes originando as peças metálicas conforme o projeto.

De acordo com Knop (2009), a operação de moldagem é realizada pela formatação de um material refratário adequado para realizar a cavidade em que o metal líquido será introduzido, o material utilizado para operações de moldagens depende do tipo de metal a ser fundido e a forma desejada do produto final, a cavidade do molde terá que conservar sua forma, até que o metal tenha se solidificado. Geralmente os moldes são formados por duas partes uma superior e outra inferior, se as peças a ser fundida apresentar regiões ocas são feitos moldes para as partes internas da peça denominadas de machos, assim os moldes acomodam a parte externa da peça.

Terminada a solidificação às peças são retiradas, promovendo a desagregação e quebra dos machos e moldes, esses resíduos que são originados nesta etapa, podem retornar para o processo produtivo sendo reaproveitados ou são enviadas para aterros industriais. Depois deste procedimento, as peças metálicas seguem para a etapa de quebra de canal para serem separadas do sistema de alimentação (canais) e seguem para a limpeza. Posteriormente as peças metálicas recebem o acabamento e controle de qualidade, nesta etapa são removidas as rebarbas existentes que acontecem na operação de usinagem. Finalmente as peças recebem uma proteção superficial pela aplicação de óleo ou pintura (TEDE, 2009).

A fundição se destaca perante aos outros métodos principais de processos de fabricação, não só por ser um dos mais antigos, mas por ser um dos mais versáteis, principalmente quando se considera os diferentes formatos e tamanhos das peças que se pode produzir neste processo. Pode produzir lingotes para laminação e forjamento, como também peças semi-acabadas que sofrerão posteriormente a usinagem.

Gossen (2005) relata a descrição de todos os processos de fundição utilizados para a confecção das peças:

- Modelação: É o inicio do processo, onde um molde da peça a ser fundida é confeccionado e usado na produção dos moldes. Se tratando de areia ligada com argila (areia verde), a areia é comprimida em torno do modelo até uma desejável dureza. No caso de ligantes químicos, o molde é quimicamente endurecido após uma leve compactação mecânica. Moldes são produzidos em duas metades, de tal maneira que modelo possa ser facilmente retirado. Quando essas duas metades são rearranjadas, origina-se uma cavidade.

- Fusão: É onde inicia a produção da peça fundida. Neste processo é gerado resíduos como: escórias dos fornos, pós do sistema de exaustão dos fornos, sucatas metálicas impróprias para o processo e pós de matérias-primas.

- Macharia: É a parte onde são fabricados núcleos de areia chamados “machos”. Os machos são feitos de areia e lingotes que são suficientemente resistentes e duros para serem fixados dentro do molde. Nesse processo, são gerados resíduos de areia de moldagem, e pós exaustão do processo de moldagem.

- Desmoldagem: Após o resfriamento - que para peças maiores pode durar alguns dias -, a peça entra no processo de desmoldagem. Este processo consiste em quebrar o molde a fim de retirar o componente fundido, ainda no estado bruto. Os resíduos gerados são: respingos de ferro, areia de moldagem, finos de areia, restos de machos.

- Quebra de canais: Consiste na quebra do sistema de alimentação da peça fundida. Gera resíduos como sucatas e areias de moldagem.

- Acabamentos: Nesta fase do processo, os canais são cortados e são realizados acabamentos através de rebolos rotativos e de outras ferramentas que visam melhorar o aspecto visual, conforme normas de comparação através de fotos.

- Tratamento térmico: Para que a estrutura do material fique conforme a sua especificação, os componentes têm que passar por um tratamento térmico. Este tratamento, que

tem por objetivo melhorar a resistência mecânica e corrosiva dos materiais, é definido através de velocidade de aquecimento, tempo e temperatura do patamar e velocidade de resfriamento.

- Oleação/Pintura: Este processo consiste da proteção da peça fundida, seja por meio da pintura, seja poróleo, ou pela combinação destes. Materiais contaminados com óleo e/ou tinta, plásticos, latas de tinta, tambores, baldes e bombonas.

As peças uma a uma são passadas pelo rebolo para eliminar as rebarbas, e depois levadas a um jateamento por granalha para melhorar o acabamento externo. Algumas peças não precisam ser usinadas, mas a maioria passa pela usinagem para um melhor acabamento para fazer alguns detalhes não permitidos no molde. Após a peça pronta, ela é pintada ou é dado um banho de óleo para evitar a corrosão (SCHEUNEMANN, 2005).

2.2.3 Resíduos sólidos

Segundo Pichat (1998), define resíduo como toda substância que o produtor abandona, destinado ao abandono ou que se encontra forçado a abandonar.

De modo geral, o setor de fundição, apesar de consumir sucatas metálicas como matéria-prima, gera grandes volumes de resíduos sólidos, entre os quais escórias, areia de moldagem e poeiras diversas (DANTAS, 2003).

De acordo com Pablos et al. (2009), para as indústrias brasileiras, gerenciar os resíduos transformou-se em um dos principais desafios enfrentados. É necessário caracterizar e quantificar quais são os resíduos industriais perigosos, não perigosos e inertes gerados, além disso, é sempre importante definir as etapas de manuseio, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização e disposição final.

Segundo a NBR 10004 (2004), os resíduos são classificados em:

a) Resíduos Classe I – Perigosos: são resíduos que em função de suas propriedades físico-químicas e infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente. São considerados perigosos os que apresentam ao menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Os resíduos que recebem esta classificação requerem cuidados especiais de destinação.

b) Resíduos Classe II – Não Perigosos: não apresentam nenhuma das características acima, podem ainda ser classificados em dois subtipos:

Classe II A – Não Inertes: são aqueles que não se enquadram no item anterior, Classe I, nem no próximo item, Classe II B. Geralmente apresenta alguma dessas características: biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.

Classe II B – Inertes: quaisquer resíduos que submetidos a um contato estático ou dinâmico com água, não tenham nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de portabilidade de água, com exceção da cor, turbidez, dureza e sabor.

A Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos - ABETRE (2003), juntamente com a Fundação Getúlio Vargas na qual foi contratada pela mesma, para desenvolver um estudo estimando a quantidade de resíduos industriais gerados anualmente no país. Neste contexto, a Tabela 2 tem como objetivo informar os dados levantados de acordo com os inventários estabelecidos pelos órgãos de cada estado, sobre a geração destes resíduos industriais.

Tabela 2- Geração de resíduos sólidos industriais no Brasil

Unidade de Federação	**Geração de Resíduos (t/ano)**			
	Classe I	**Classe II – A**	**Classe II – B**	**Total**
SP	535.615	25.038.167	1.045.895	26.619.677
RJ	293.953	5.768.562 (*)		6.062.515
RS	205.326	1.404.732	25.632	1.635.690
PR	634.543	15.106.393(*)		15.740.936
PE	12.622	1.325.791	4.071	1.342.483
GO	4.405	1.486.969 (*)		1.491.374

Legenda: (*) Resíduos não perigosos

Fonte: ABETRE (2003)

Segundo dados apresentados pela FEPAM, por meio do relatório sobre a geração de resíduos sólidos industriais no estado do Rio Grande do Sul, na qual foram analisadas no mesmo, 2.192 indústrias no estado, entre elas 16 indústrias da região das Missões, com o objetivo de ter a quantidade de resíduos sólidos industriais gerados, ou seja, resíduos de Classe I e Classe II. A Tabela 3 apresenta a distribuição de resíduos gerados por cada Classe em (t/ano) e (%).

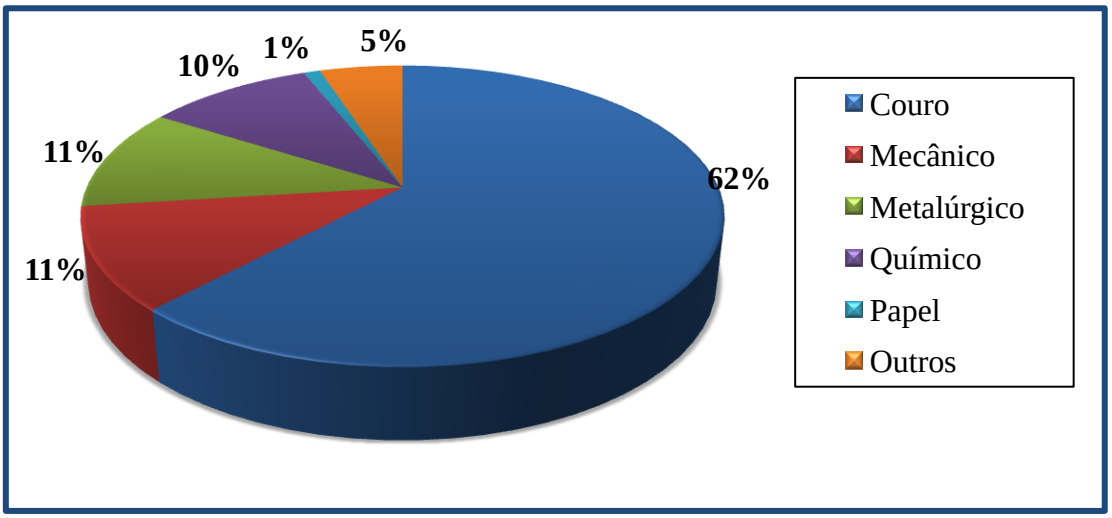
Tabela 3- Quantidade de resíduos sólidos industriais gerados pela Classe I e Classe II

CLASSE DO RESIDUO	Total de Resíduos (t/ano)	Total de Resíduos (%)
Classe I	189.203	8
Classe II	2.174.682	92
Total	**2.363.886**	**100**

Fonte: FEPAM (2003)

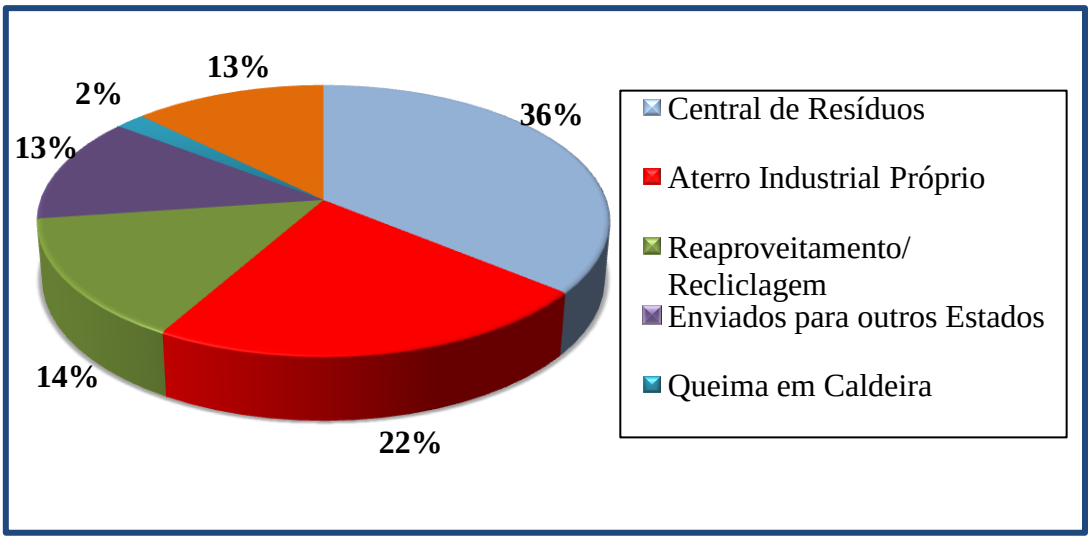
A Figura 3 apresenta a quantidade de resíduos sólidos industriais perigosos, Classe I, gerados por setor industrial, já a Figura 4 tem como objetivo expor a destinação dos resíduos sólidos industriais Classe I gerados pelas indústrias do estado do Rio Grandes do Sul na qual são licenciados pelo FEPAM.

Figura 3- Geração de resíduo sólido industrial Classe I por setor industrial



Fonte: FEPAM (2003)

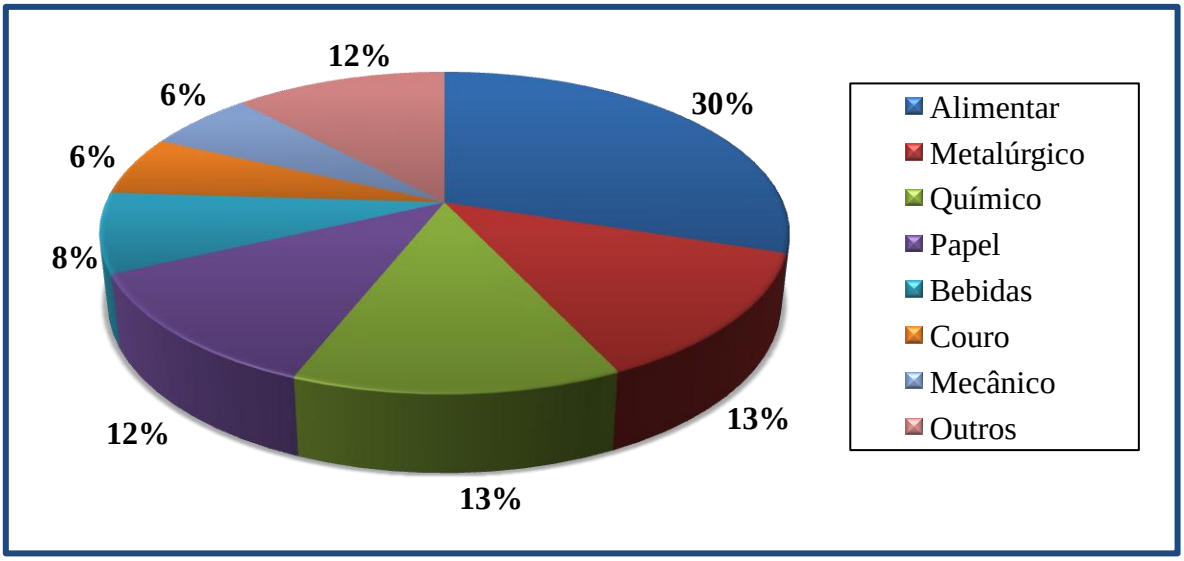
Figura 4- Destinação dos resíduos sólidos industriais Classe I



Fonte: FEPAM (2003)

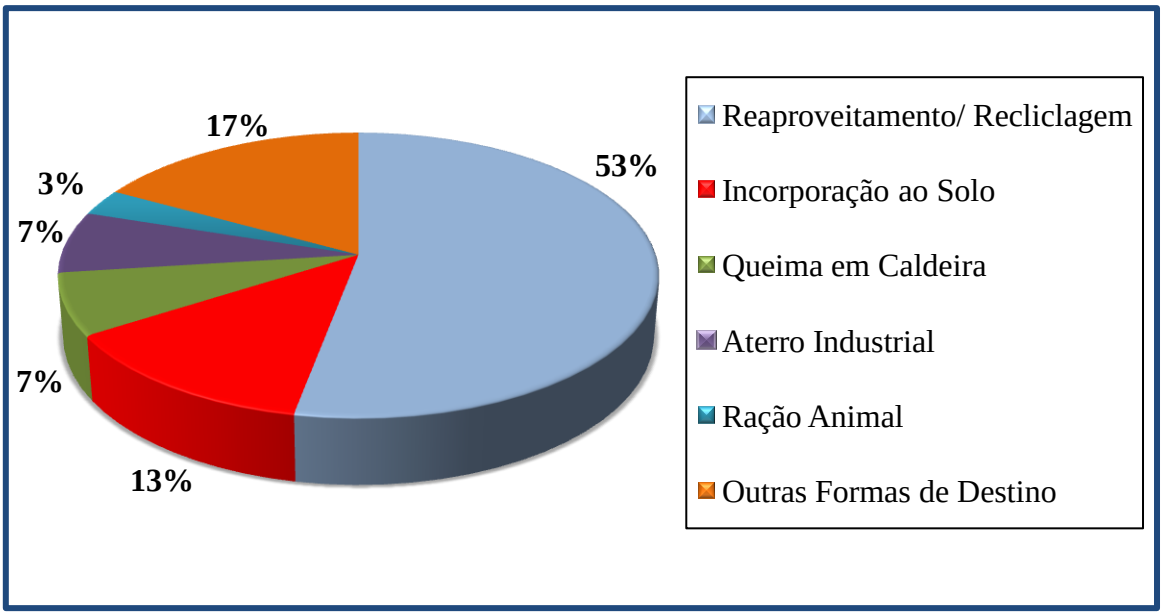
A Figura 5 apresenta a quantidade de resíduos sólidos industriais não perigosos, Classe II gerados por setor industrial. Logo a Figura 6 mostra informações relativas ao destino final dos resíduos perigosos gerados pelas indústrias do estado do Rio Grande do Sul licenciadas pela FEPAM.

Figura 5- Geração de resíduo sólido industrial Classe II por setor industrial



Fonte: FEPAM (2003)

Figura 6- Destinação dos resíduos sólidos industriais Classe II



Fonte: FEPAM (2003)

De acordo com Lopes (2009), o grande problema das empresas de fundição atualmente são os seus resíduos sólidos. A disposição dos resíduos de areias de fundição em aterros industriais, quando não monitorado, torna-se perigoso para a população e gera um sério problema ambiental, devido ao volume produzido, além disso, acarreta um problema adicional, pois os órgãos e regulamentos ambientais levam as empresas a destinar seus resíduos em aterros cada vez mais distantes do local gerado, aumentando consideravelmente os custos envolvidos, além da empresa se preocupar cada vez mais com o cuidado de gerenciamento, tratamento, manutenção e destinação final dos resíduos ao aterro, se torna uma responsabilidade à empresa por toda a sua trajetória de vida.

2.3 Sustentabilidade

Nas últimas décadas evidenciou-se um aumento na preocupação com a temática ambiental em todo o mundo, ou seja, pode-se afirmar que garantir a sustentabilidade nas cidades, empresas e no país é dar garantias de que o mesmo explorado, essa área continuará a prover recursos e bem estar econômico e social para as comunidades que nela vivem por muitas gerações futuras..

Segundo o site Brasil Sustentável (s/d), sustentabilidade é a capacidade do ser humano interagir com o mundo, visando preservar o meio ambiente, não comprometendo as gerações futuras.

Os graves desafios enfrentados nos dias de hoje indicam a necessidade de ações educacionais que possam disponibilizar conhecimento para a construção de um novo modelo de civilização, onde governos, empresas, escolas, instituições da sociedade civil e comunidades adquiram e adotem práticas, metodologias e tecnologias sustentáveis, que colaborem na recuperação e conservação do meio ambiente e na melhoria da qualidade de vida da humanidade.

Atualmente está ocorrendo significativas mudanças, os órgãos públicos estão tentando implantar na sociedade o desenvolvimento sustentável, a fim de obter crescimento econômico necessário, garantindo a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento social para o presente e gerações futuras. Neste contexto muitas empresas e até mesmo universidades e escolas estudam a possibilidade de redução do uso de matérias-primas e produtos e o aumento da reutilização e da reciclagem.

2.3.1 Sustentabilidade na construção civil

Segundo Goldemberga et al. (2012), a Construção Civil é responsável pela transformação do ambiente natural no ambiente construído, que precisa ser permanentemente atualizado e mantido. Infelizmente, a cadeia produtiva da Construção Civil, encontra- se na incômoda situação de ser apontado como o vilão da Natureza. O impacto ambiental gerado pela Construção Civil geralmente está em todas as suas etapas de produção, por exemplo: extração de matérias-primas; produção e transporte de materiais; concepção e projetos; execução (construção), práticas de uso e manutenção, a demolição/desmontagem, além da destinação de resíduos gerados ao longo da vida útil. Todas essas etapas citadas envolvem recursos ambientais, econômicos e trazem impactos sociais que atingem a todos os cidadãos, empresas e órgãos governamentais.

A cadeia produtiva de materiais e componentes de construção, isoladamente, tem impacto significativo que precisa ser moderado. Na fase de execução de um edifício, por exemplo, ocorre à geração de uma parcela significativa de resíduos, fator muito preocupante principalmente nas áreas urbanas. O volume de resíduos gerado é agravado pelas perdas dos processos ainda não

otimizados. Apesar de uma conscientização tardia, a Construção Civil vem tomando ações decisiva para se tornar menos agressiva à Natureza, por meio de posturas cada vez mais proativas (GOLDEMBERGA, 2012). A Figura 7 e 8 ilustra resíduos na Construção Civil gerados pelas etapas da obra na execução de um edifício.

Figura 7- Resíduos gerados na Construção Civil

Fonte: Site IAB (2012)

Figura 8- Resíduos gerados na Construção Civil na execução de um edifício

Fonte: Site IAB (2012)

De acordo com SindusCon-SP (2005), as soluções para a gestão dos resíduos da construção e demolição nas cidades devem ser viabilizadas de um modo a integrar a atuação dos seguintes agentes:

• o órgão público municipal – responsável pelo controle e fiscalização sobre o transporte e destinação dos resíduos;

• os geradores de resíduos – responsável pela observância dos padrões previstos na legislação específica no que se refere à disposição final dos resíduos, fazendo sua gestão interna e externa.

• as transportadoras – responsável pela destinação aos locais licenciados e apresentação do comprovante da destinação.

Muitas empresas estão se comprometendo a dar a destinação correta para esses resíduos, ou a mesma reutiliza os materiais, como por exemplo, a chapa compensada utilizada para a confecção de formas de pilares, onde a mesma será aproveitada em outras obras onde a empresa irá executar o projeto. Outra questão que vêm sendo cada vez mais analisada e debatida não só nas empresas como também em universidades, é a reutilização desses resíduos no próprio concreto, blocos, em argamassas e até mesmo na área de pavimentação no CBUQ, substituindo assim, alguma matéria prima natural por esses resíduos da Construção Civil, mais conhecidos como “entulho”.

2.3.2 Substituição de matérias primas naturais por Areia Descartada de Fundição (ADF)

A indústria da construção civil apresenta-se com um grande potencial para a solução dos problemas dos descartes dos resíduos gerados nesse setor, pois apresenta uma grande potencialidade em incorporar esses resíduos nos materiais de construção, possibilitando a redução dos custos dos produtos de construção, alem de contribuir para a diminuição da emissão de resíduos ao meio ambiente (BIOLO, 2005).

Muitos estudos estão sendo ou já foram realizados visando encontrar soluções viáveis para a destinação dos resíduos industriais e ainda reduzir os impactos ao meio ambiente oferecendo matéria-prima para a construção civil.

Como exemplo, pode ser citado o resultado de um projeto desenvolvido por alunos da Universidade de Caxias do Sul (UCS), com o apoio de indústrias caxienses, que já estão licenciadas para utilizar as ADF's como matéria-prima na construção de blocos de concreto. Bolsistas da Universidade comprovaram, após muitos estudos, testes e análises da areia e do produto final, a viabilidade desse reaproveitamento. Foi constatado que esse resíduo substitui a areia quartzosa, conhecida como areia natural. A meta da pesquisa era verificar se o material teria a resistência exigida pela Associação de Normas Técnicas - ABNT e ficaria abaixo do limite de toxicidade permitido pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente - CEMA, o que foi comprovado na pesquisa. Um dos trunfos da iniciativa é a redução dos impactos ambientais: diminuição das áreas de armazenamento do que é rejeitado pela indústria e a redução da extração de areia natural.

No caso da região de Caxias, essa areia vem da desagregação de rochas, do Rio Jacuí e outros que compõe a bacia. Mesmo legalizadas, a extração sempre acaba impactando o meio ambiente. Em São Paulo o resíduo da areia de fundição como opção para construção civil por meio de blocos e também em asfalto já é feito há mais tempo, assim também em outros países como Espanha e Alemanha. Para a realização do estudo em questão o repasse da areia deu-se através de duas indústrias geradoras do resíduo da cidade de Caxias do Sul e outra indústria da mesma localidade fabricou os blocos de concreto. A combinação utilizada para a fabricação foi de 35% da massa total dos blocos fabricados com resíduos industriais.

Esses projetos permitem que as indústrias deixem de gerar um passivo para dar origem a um ativo. A criação NBR 15702 (2009) – Areia Descartada de Fundição – Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário, permitiu a realização deste e de outros projetos. BONET (2002) propôs o reaproveitamento da areia residual de fundição como agregado fino no Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e Coutinho (2004) estudou a possibilidade de utilizá-la em misturas asfálticas densas; o primeiro trabalho recomendou a utilização de 8% do resíduo, em peso, na mistura asfáltica, enquanto Coutinho (2004) concluiu que até 15% de incorporação de areia na mistura asfáltica, em peso, produz materiais com boas propriedades mecânicas sem impactos ambientais significativos.

Na busca de aplicações que permitam a reutilização da areia residual de fundição em quantidades maiores, KLINSKY (2008) avaliou a possibilidade de reutilizar o resíduo como base

e sub-base de pavimentos de baixo volume de tráfego, através de sua incorporação a solos argilosos. O autor concluiu que teores de areia de 40 a 60% poderiam ser incorporados a solos lateríticos argilosos para obter materiais com comportamento semelhante ao do Solo Arenoso Fino Laterítico, material ideal para ser utilizado em bases e sub-bases de pavimentos de baixo custo. No Rio Grande do Sul o destino das areias de fundição está distribuído da seguinte forma: Aterros Licenciados pela FEPAM: 81%, Aterros particulares: 8%, Reaproveitamento: 6%, Aterros Municipais: 3%, Estocado: 2% (BONET,2002). A alternativa de destinar os excedentes da areia para o reuso externo exige pouco investimento e os custos operacionais tendem a ser baixos (BIOLO, 2005).

O reaproveitamento da ADF será inevitável em um futuro próximo, tendo em vista o fato de que os custos e dificuldades de disposição final deste tipo de resíduo vêm aumentando sistematicamente e a legislação ambiental está cada vez mais restritiva, além da necessidade de minimizar o impacto ambiental decorrente da extração da areia nova (STOLF, 2007).

Outro exemplo do reaproveitamento da ADF foi analisado por Foguesatto (2007), que estudou a substituição da areia natural pela areia residual do processo de fundição como agregado para concreto. O autor avaliou à resistência à compressão em corpos de prova de CCP com substituição de 25%, 50% e 75% de areia natural por areia de fundição, com e sem a utilização de um aditivo superplastificante, que teve como resultados através dos ensaios laboratoriais que a utilização de aditivo em concretos com composições de areia de fundição teve uma eficiência elevada, dando alta trabalhabilidade a uma mistura que não apresentava boa trabalhabilidade, porém a resistência à compressão foi prejudicada, não alcançando a resistência de dosagem. Já o concreto sem o uso de aditivo superplastificante os resultados foram semelhantes e alguns casos melhores que à resistência de um traço com somente a areia natural (traço de referência).

O estudo realizado por STOLF (2007), em relação à recuperação de areia fenólica oriunda do processo de fabricação de machos e moldes na indústria de fundição, indica que este resíduo pode ser reutilizado para a confecção de blocos e bloquetes, pois os resultados dos níveis de fenol presente nas amostras de areia e de argamassa foram inferiores aos limites estabelecidos pela Companhia de Tecnologia do Estado de São Paulo - CETESB. O autor afirma que esta alternativa permitirá uma diminuição dos descartes destas areias em aterros industriais e também uma

redução nos gastos das empresas com a disposição final destes resíduos. Adicionalmente, pode até fomentar a criação de outro setor dentro das indústrias de fundição, na área de recuperação de resíduos.

Há também muitos estudos para utilização das ADF como cobertura de aterros de resíduos domésticos, teoricamente é a solução ideal, pois são grandes volumes em áreas já licenciadas para receber resíduos classe IIA e pode reduzir custos e impactos ambientais na gestão destes aterros, eliminando a necessidade de buscar terra para cobertura. É uma alternativa muito utilizada no exterior, principalmente nos Estados Unidos - USA. A CETESB se manifestou favoravelmente desde que sejam em aterros licenciados e seja feito um trabalho de engenharia que comprove a viabilidade técnica na manutenção ou melhorias nas características das coberturas originalmente previstas em projeto.

No ano de 2000, entrou em operação no interior do estado de São Paulo, a primeira empresa da América Latina fabricante de artefatos de concreto utilizando a areia descartada de fundição como substituta da areia comum. Com esta substituição, os produtos não perderam qualidade e tornaram-se 15% mais baratos se comparados aos similares convencionais. As aplicações em artefatos de concreto são mais indicadas para pequenas e médias gerações de areia descartada de fundição. Para grandes volumes, as utilizações em obras de pavimentação e coberturas de aterros sanitários, são mais adequadas. Na pavimentação, estas areias podem substituir o pó de pedra em obras de cobertura asfáltica, enquanto que nos aterros sanitários a ADF substitui a terra para cobertura diária.

No final de 2007, a CETESB liberou a Decisão de Diretoria Nº 152, que estabelece os procedimentos que devem ser seguidos pelas empresas instaladas no estado de São Paulo que pretendem reaproveitar as ADF na produção de artefatos de concreto ou na pavimentação asfáltica. A partir desta data, várias fundições conseguiram o parecer técnico favoráveis deste órgão ambiental para o reaproveitamento da ADF. Algumas destas fundições já estão com projetos bem adiantados para a implantação do processo completo de reaproveitamento. Seguindo estes passos, os órgãos ambientais dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul também estabeleceram as suas diretivas para o reaproveitamento das ADF.

3. METODOLOGIA

3.1 Classificação da pesquisa

A pesquisa é de ordem quantitativa, desenvolvendo estudo baseado em ensaios laboratoriais.

3.2 Planejamento da pesquisa

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica para suporte de informações necessárias para o entendimento da pesquisa.

Após, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, importante para o processo de dosagem do concreto, tais como: ensaio de granulometria, massa específica, massa unitária e módulo de finura.

O estudo de dosagem foi executado através do método de ABCP, na qual foram desenvolvidos os seguintes traços:

· Traço referência (TR), moldado somente com areia natural;

Para realizar a dosagem com as duas areias de fundição confeccionadas nos processos da fábrica (Macharia e Quebra de Canal), foram adotadas as seguintes substituições:

· Traço AM5 e AQC5, moldado com 5% de substituição de areia natural por areia de fundição - AM (Macharia) AQC (Quebra de Canal);

· Traço AM10 e AQC10, moldado com 10% de substituição de areia natural por areia de fundição - AM (Macharia) AQC (Quebra de Canal);

· Traço AM15 e AQC15, moldado com 15% de substituição de areia natural por areia de fundição - AM (Macharia) AQC (Quebra de Canal);

· Traço AM20 e AQC20, moldado com 20% de substituição de areia natural por areia de fundição - AM (Macharia) AQC (Quebra de Canal);

· Traço AM25 e AQC25, moldado com 25% de substituição de areia natural por areia de fundição - AM (Macharia) AQC (Quebra de Canal);

· Traço AM30 e AQ30, moldado com 30% de substituição de areia natural por areia de fundição - AM (Macharia) AQC (Quebra de Canal);

· Traço AM50 e AQC50, moldado com 50% de substituição de areia natural por areia de fundição - AM (Macharia) AQC (Quebra de Canal);

Foram adotadas essas porcentagens de substituição de areia de Macharia e Quebra de Canal, para analisar a variação de resistência à compressão axial, ou seja, ter maior certeza do resultado final que a substituição de areia natural por este resíduo pode interferir nas propriedades do concreto.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias, já para análise do ensaio de microscopia eletrônica de varredura e lixiviação foi analisado a mistura com 50% de substituição de areia natural por areia de fundição (Macharia e Quebra de Canal).

3.3 Materiais utilizados

3.3.1 Cimento

O cimento é um material com propriedades aglutinantes, aglomerantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água.

O cimento Portland utilizado para a pesquisa foi o CP IV- 32. Este cimento aumenta a durabilidade das estruturas de concreto que entram em contato com ambientes agressivos e que estão sujeitos a ataque de sulfatos, tais como esgotos, água do mar, permitindo uma maior vida útil da estrutura e minimizando o risco de gastos com manutenção a curto e a médio prazo.

A composição cimento Portland pode variar dependendo da mistura que será preparada, a Tabela 4 demonstra a relação dos componentes que podem ser utilizados.

Tabela 4- Composição química do cimento CP IV - 32

Componente Químico	Faixa de concentração
Silicato tricálcico (C3S)	20 - 70
Silicato dicálcico (Ca2Si)	10 - 60
Ferro-aluminato de cálcio (C4AFe)	5 - 15
Sulfato de cálcio (CaSO4)	2 - 8
Aluminato tricálcico (C3A)	1 - 15
Carbonato de cálcio (CaCO3)	0 - 10
Óxido de magnésio (MgO)	0 - 6
Óxido de cálcio	0 - 2

Fonte: Itambé (2014)

Para a caracterização física do cimento, foram realizados ensaios no Laboratório de Engenharia Civil - UNIJUÍ conforme demonstrados na Figura 9 e apresentados os resultados na Tabela 5, os ensaios estão de acordo com as seguintes normas:

- Finura # 0,075mm – NBR 11579 (1991);
- Massa específica – NBR NM 23 (2001);
- Determinação do Tempo de pega – NBR NM 65 (2002).

Figura 9- Caracterização física do cimento

Fonte: Próprio autor (2014)

Tabela 5- Características físicas do cimento CP IV-32

Propriedade	Resultado
Finura # 0,075 (%)	0,56
Massa específica (g/cm³)	2,775
Massa unitária solta (kg/dm³)	0,885
Tempo de pega (hrs)	05:31

Fonte: Próprio autor (2014)

3.3.2 Agregado miúdo

A) Areia natural

A areia natural utilizado neste estudo é areia média proveniente da empresa Paim localizada no município de Coronel Barros - RS. Os ensaios de caracterização do material foram feitos no Laboratório de Engenharia Civil - UNIJUÍ, utilizando os ensaios abaixo relacionados, conforme as normas preconizadas. O material utilizado é representado pela Figura 10 e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

- Composição Granulométrica – NBR 7217 (2009);
- Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776 (2003);
- Massa unitária solta – NBR 7251 (1982).

Figura 10- Aspecto visual do agregado miúdo natural

Fonte: Próprio autor (2014)

Tabela 6- Características da areia natural

Propriedade	Resultado
Massa Específica (g/cm³)	2,584
Massa Unitária Solta (kg/dm³)	1,585
Dmáx. Característico (mm)	1,2
Módulo de Finura	1,84

Fonte: Próprio autor (2014)

B) Areia de fundição

A areia de fundição utilizada na pesquisa é proveniente da empresa FUNDIMISA localizada no município de Santo Ângelo - RS. Um dos maiores problemas do setor de fundição na empresa é justamente a geração destes resíduos sólidos, constituídos principalmente pelas denominadas areias residuais ou areias descartadas de fundição.

Para está pesquisa, foram analisadas as areias geradas no processo de macharia e quebra de canal (Figura 11 e 12).

Figura 11- Areia de Fundição no processo de macharia

Fonte: Próprio autor (2014)

Figura 12- Areia de fundição no processo de quebra de canal

Fonte: Próprio autor (2014)

Para obter a classificação química e a caracterização deste resíduo, foram enviadas amostras desta areia de fundição para análise laboratorial realizando os ensaios de lixiviação e solubilização de acordo com a NBR 10004 (2004), 10005 (2004) e 10006 (2004) conforme consta o Anexo A. Segundo os diagnósticos realizados a areia de fundição se apresentou dentro dos limites permitidos pela NBR 10004 (2004). No ensaio de lixiviação pela ABNT NBR 10.005:2004 os parâmetros satisfazem os limites permitidos, o resíduo apresentou-se como NÃO TÓXICO, com esses resultados comprovou-se que esse resíduo pode ser reutilizado como matéria prima, por ser uma areia de fundição de Classe II A – não inerte.

Foram realizados os ensaios de caracterização de cada areia de fundição (Macharia e Quebra de Canal) no Laboratório de Engenharia Civil - UNIJUÍ, de acordo com os ensaios abaixo e conforme as normas recomendadas. Os resultados estão apresentados na Tabela 7 e 8.

- Composição Granulométrica – NBR 7217 (2009);
- Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776 (2003).

Tabela 7- Características da areia de fundição (Macharia)

Propriedade	Resultado
Massa Específica (g/cm³)	2,01
Dmáx. Característico (mm)	2,4
Módulo de Finura	1,88

Fonte: Próprio autor (2014)

Tabela 8- Caracterização da areia de fundição (Quebra de Canal)

Propriedade	Resultado
Massa Específica (g/cm³)	2,46
Dmáx. Característico (mm)	0,6
Módulo de Finura	1,44

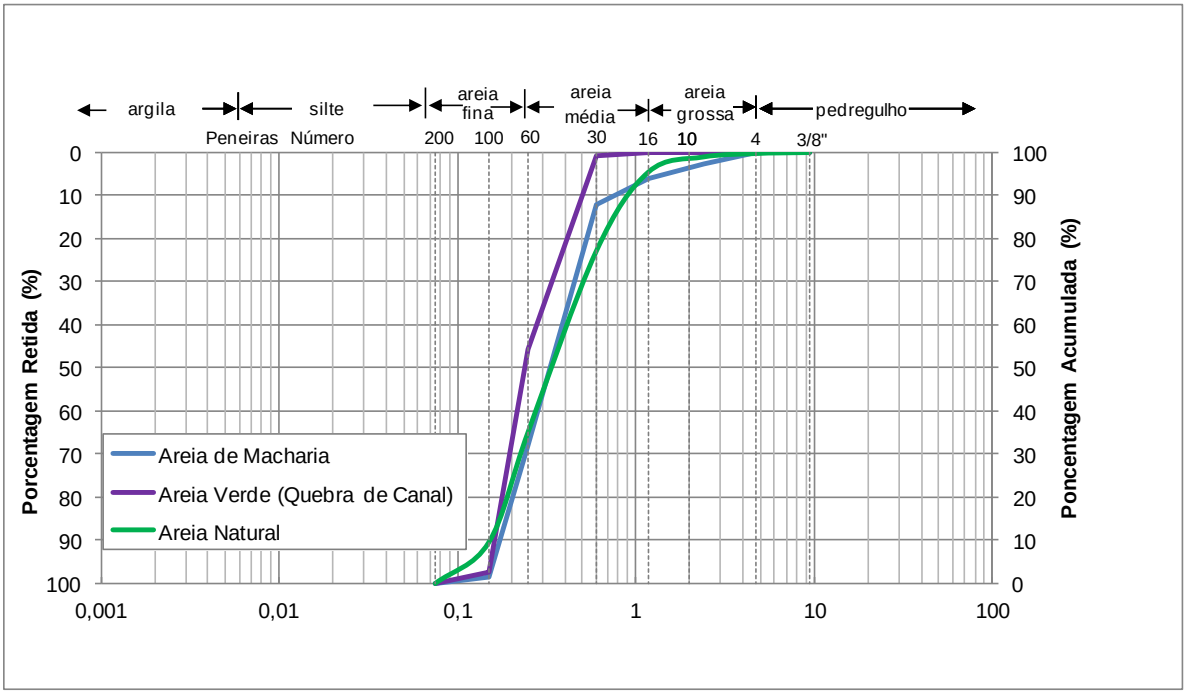
Fonte: Próprio autor (2014)

A Figura 13 apresenta-se a curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados na pesquisa, podendo assim, analisar um comparativo entre ambas as areias: natural e de fundição. A areia, conforme sua distribuição granulométrica e seu módulo de finura (MF), de acordo com a NBR 7211(1983), podem ser classificadas como:

- muito finas – 1,35 < MF < 2,25;
- finas – 1,71 < MF < 2,78;
- médias – 2,11 < MF < 3,28;
- grossas – 2,71 < MF < 4,02.

Observa-se, de acordo com esses dados, que o módulo de finura da areia natural e areia de macharia se enquadram a classificação de areia fina, porém a curva granulométrica nos mostra que as dimensões dos grãos nos proporcionam areia média. Já a areia quebra de canal é classificada como areia fina.

Figura 13- Granulometria dos agregados miúdos



Fonte: Próprio autor (2014)

3.3.3 Agregado graúdo

A pedra brita consumida na pesquisa é Brita 1, de origem basáltica, proveniente da região de Ijuí, RS. Os ensaios de caracterização do material foram feitos no Laboratório de Engenharia Civil – UNIJUÍ, utilizando os ensaios abaixo relacionados, bem como preconiza a norma. Os resultados estão apresentados na Tabela 9 e na Figura 14.

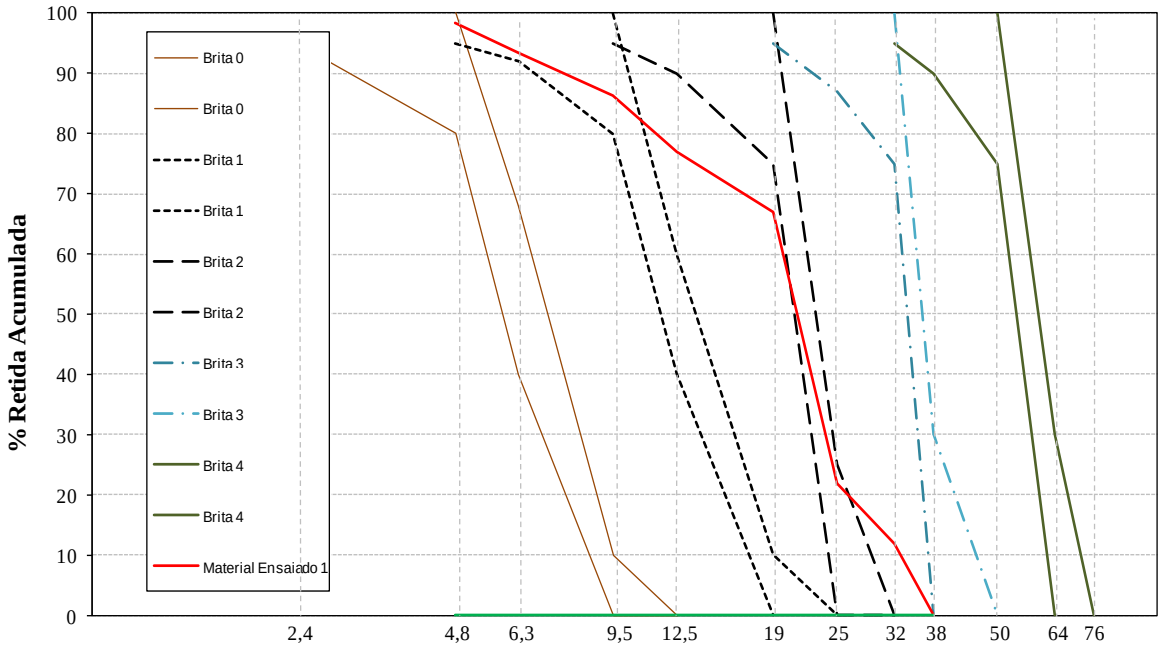
- Composição Granulométrica – NBR NM 248 (2001)
- Massa específica e absorção do agregado graúdo – NBR NM 53 (2002)
- Massa unitária solta – NBR 7251 (1982).

Tabela 9- Características do agregado graúdo

Propriedade	Resultado
Massa Específica (g/cm³)	2,929
Massa Unitária Solta (kg/dm³)	1,647
Absorção (%)	1,195
Dmáx. Característico (mm)	19
Módulo de Finura	6,90

Fonte: Próprio autor (2014)

Figura 14- Granulometria do agregado graúdo



Fonte: Próprio autor (2014)

3.3.4 Água

Para a produção dos traços foi utilizada água proveniente de poço artesiano que abastece o Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ.

3.4 Dosagem dos traços

O método de dosagem utilizado para realizar está pesquisa foi o da ABCP, este método é recomendado para a dosagem de concretos com trabalhabilidade adequada para a moldagem in loco, ou seja, a consistência deve ser de semi-plástica à fluída. Para a utilização deste método é necessário que se tenha as informações: da massa específica granulométrica, dimensão máxima, modulo de finura, etc. Os procedimentos destes ensaios já foram citados anteriormente.

O abatimento de tronco estabelecido para a pesquisa foi de 80 a 100 mm. A quantidade de água para se obtiver um determinado abatimento depende: do tamanho máximo, da forma, da textura e da granulométrica do agregado graúdo.

O cálculo da dosagem para os traços se encontram no ANEXO B, com os traços calculados, foi estabelecido à quantidade de material necessário para a fabricação de 10 corpos-de-prova utilizados para se obter as resistências de 3, 7, 14, 21 e 28 dias, sendo usado dois corpos-de-prova para cada idade.

Os Quadro 4 e 5, apresentam a quantidade de material para cada traço, ou seja, o traço de referência como também os traços com a substituição de areia natural por areia de fundição (Macharia e Quebra de Canal).

Quadro 4- Consumo de materiais por traço para a substituição de areia natural por areia de fundição (Macharia)

TRAÇO	Consumo Cimento	Consumo Areia Natural	Consumo Areia de Fundição (Resíduo)	Consumo Brita	Consumo Água	Fator (a/c)
TR	10,98 Kg	17,82 Kg	X	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AM5	10,98 Kg	16,929 Kg	0,891Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AM 10	10,98 Kg	16,038 Kg	1,782Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AM 15	10,98 Kg	15,147 Kg	2,673Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AM 20	10,98 Kg	14,256 Kg	3,564Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AM 25	10,98 Kg	13,365 Kg	4,455Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AM 30	10,98 Kg	12,474 Kg	5,346Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AM 50	10,98 Kg	8,91 Kg	8,91Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56

Fonte: Próprio autor (2014)

Quadro 5- Consumo de materiais por traço para a substituição de areia natural por areia de fundição (Quebra de Canal)

TRAÇO	Consumo Cimento	Consumo Areia Natural	Consumo Areia de Fundição (Resíduo)	Consumo Brita	Consumo Água	Fator (a/c)
TR	10,98 Kg	17,82 Kg	X	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AQC 5	10,98 Kg	16,929 Kg	0,891Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AQC 10	10,98 Kg	16,038 Kg	1,782Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AQC 15	10,98 Kg	15,147 Kg	2,673Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AQC 20	10,98 Kg	14,256 Kg	3,564Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AQC 25	10,98 Kg	13,365 Kg	4,455Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AQC 30	10,98 Kg	12,474 Kg	5,346Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56
AQC 50	10,98 Kg	8,91 Kg	8,91Kg	38,04 Kg	6,15 l	0,56

Fonte: Próprio autor (2014)

Após estabelecer a quantidade de consumo de cada material utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova, partiu-se para a mistura dos traços em betoneira (Figura 15). Realizou-se a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, também conhecido como Slump Test, na qual se estabeleceu que o concreto apresentasse uma consistência plástica, sendo então adotado o abatimento do tronco de cone de 90±10mm. Para realização do Slump Teste, primeiramente umedeceu-se o molde e a placa de base. Durante o preenchimento do molde com o concreto, foi posicionado os pés sobre suas aletas de forma a se manter estável. Encheu-se rapidamente o molde com o concreto em três camadas, no qual cada uma das camadas sofreu a compactação de 25 golpes da haste de cone, o ensaio realizado está de acordo com a NBR NM 67 (1996), e seus procedimentos estão ilustrados na Figura 16.

Figura 15- Materiais utilizados para moldagem

Fonte: Próprio autor (2014)

Figura 16- Slump Test

Fonte: Próprio autor (2014)

Os valores do abatimento de cone (Slump Test), fator corrigido de a/c e da massa especifica do concreto estão no Quadro 6 e 7, a seguir.

Quadro 6- Valores do abatimento do tronco de cone (Slump Test) e fator a/c final para a substituição de areia natural por areia de fundição (Macharia) no concreto

TRAÇO	Abatimento mm	Consumo real de água	Fator a/c corrigido	Peso Específico do Concreto
TR	95,00	5,71 l	0,52	2295,0 kg/m³
AM 5	83,00	5,90 l	0,54	2256,0 kg/m³
AM 10	83,00	5,81 l	0,53	2274,0 kg/m³
AM 15	98,00	5,42 l	0,50	2215,0 kg/m³
AM 20	100,00	5,52 l	0,50	2287,0 kg/m³
AM 25	93,00	5,52 l	0,50	2270,0 kg/m³
AM 30	95,00	5,93 l	0,54	2254,0 kg/m³
AM 50	100,00	5,19 l	0,48	2203,0 kg/m³

Fonte: Próprio autor (2014)

Quadro 7- Valores do abatimento do tronco de cone (Slump Test) e fator a/c final para a substituição de areia natural por areia de fundição (Quebra de Canal) no concreto

TRAÇO	Abatimento mm	Consumo real de água	Fator a/c corrigido	Peso Específico do Concreto
TR	95,00	5,71 l	0,52	2295,0 kg/m³
AQC 5	94,00	5,62 l	0,51	2253,0 kg/m³
AQC 10	95,00	5,39 l	0,50	2276,0 kg/m³
AQC 15	100,00	5,43 l	0,50	2300,0 kg/m³
AQC 20	96,00	5,62 l	0,51	2281,0 kg/m³
AQC 25	100,00	5,64 l	0,51	2258,0 kg/m³
AQC 30	95,00	5,54 l	0,50	2260,0 kg/m³
AQC 50	96,00	5,48 l	0,50	2275,0 kg/m³

Fonte: Próprio autor (2014)

Ao atingir-se a trabalhabilidade desejada para cada traço, moldaram-se corpos-de-prova com dimensões de 10x20cm para ensaios do concreto endurecido. O ensaio consiste primeiramente em revestir os corpos de prova com uma camada fina de óleo mineral, a partir disso, foi colocado em duas camadas de 12 golpes o concreto dentro dos moldes. Estes procedimentos estão conforme a com a NBR 5738 (2003) e ilustrados na Figura 17. Após a moldagem, os corpos de prova ficaram expostos à temperatura ambiente nas primeiras 24 horas, sendo posteriormente desmoldados e acondicionados em câmara úmida sob temperatura de 23 ± 2 ºC e umidade > 95%, onde permaneceram até as datas dos ensaios de 3, 7, 14, 21, e 28 dias.

Figura 17- Moldagem dos corpos de prova

Fonte: Próprio autor (2014)

3.4 Ensaio de resistência a compressão

A resistência à compressão axial dos concretos foi avaliada por meio de corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro com 20 cm de altura. O ensaio para a determinação da resistência foi feito no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ, em prensa normatizada para as idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias a partir da moldagem realizada, conforme a NBR 5739 (2007). De acordo com a referida norma o corpo-de-prova cilíndrico deve ser posicionado de modo que, quando estiver centrado, seu eixo coincida com o da maquina, fazendo que a resultante das forças passe pelo centro (Figura 15). A resistência à compressão é calculada pela equação (1) a seguir:

$$fc = \frac{4F}{\pi x D^2}$$

Equação (1)

Onde:

FC: é a resistência à compressão, em MPa;

F: é a força máxima alcançada, em Newtons;

π: Pi;

D: é o diâmetro do corpo-de-prova em mm.

Figura 18- Ensaio de resistência à compressão axial

Fonte: Próprio autor (2014)

3.5 Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizados no Laboratório de Microscopia da UPF, localizada no município de Passo Fundo - RS. O equipamento conta com o detector de energia dispersiva EDS (energy dispersive x-ray detector, EDX ou EDS), com capacidade para ampliações até 400 mil vezes, e para análise semiquantitativa da composição química elementar das amostras.

As amostras foram analisadas no MEV, com a finalidade de observar a microestrutura para cada cubo de concreto com substituição de areia natural por 50% de areia de fundição (Macharia e Quebra de Canal).

Após os corpos-de-prova serem submetidos ao ensaio de compressão axial, os cubos para a realização do ensaio de MEV, foram retirados com o auxílio de talhadeira e posteriormente os mesmos, foram imersos em álcool isopropílico, com o intuito de paralisar as reações de

hidratação da pasta e em seguida secos em estufa a temperatura de 60ºC por 24h, podendo assim, serem armazenados em embalagens fechadas.

O ensaio de MEV está ilustrado na Figura 16, onde as amostras primeiramente foram colocadas em um recipiente a vácuo para ser revestidas sendo pulverizadas com uma fina camada de ouro (1 e 2), a fim de proporcionar as interações eletrônicas necessárias. Logo após este procedimento, as amostras puderam ser analisadas pelo microscópio (3), tendo assim, como resultados a microscopia e a composição química do elemento estudado (4).

Figura 19- Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Fonte: Próprio autor (2014)

3.6 Ensaio de lixiviação

A classificação dos resíduos é baseada normalmente na avaliação do comportamento deste em contato com um solvente. Assim, a lixiviação é o procedimento mais utilizado para analisar a potencialidade de transferência de matéria para o meio natural.

Os ensaios de lixiviação são utilizados para determinar ou avaliar a estabilidade química dos resíduos, quando em contato com soluções aquosas, permitindo assim verificar o grau de imobilização de contaminantes (ROCCA, 1993).

Os ensaios de lixiviação são utilizados tanto para fins científicos, quando se pretende determinar o comportamento de uma substância face a fenômenos físico-químicos que ocorrem durante uma percolação, como para caracterizar a periculosidade de um resíduo, visando o controle de resíduos sólidos perigosos.

Assim, este ensaio procura reproduzir em laboratório os fenômenos de arraste, diluição e de dessorsão que ocorrem pela passagem de água através de um resíduo, quando disposto no meio ambiente. Tal ensaio pode representar vários anos do fenômeno natural de lixiviação. O teste de lixiviação é empregado na classificação de resíduos sólidos desde que os mesmos não estejam perfeitamente caracterizados como resíduos perigosos, segundo as normas adotadas (ARROIO, 1984).

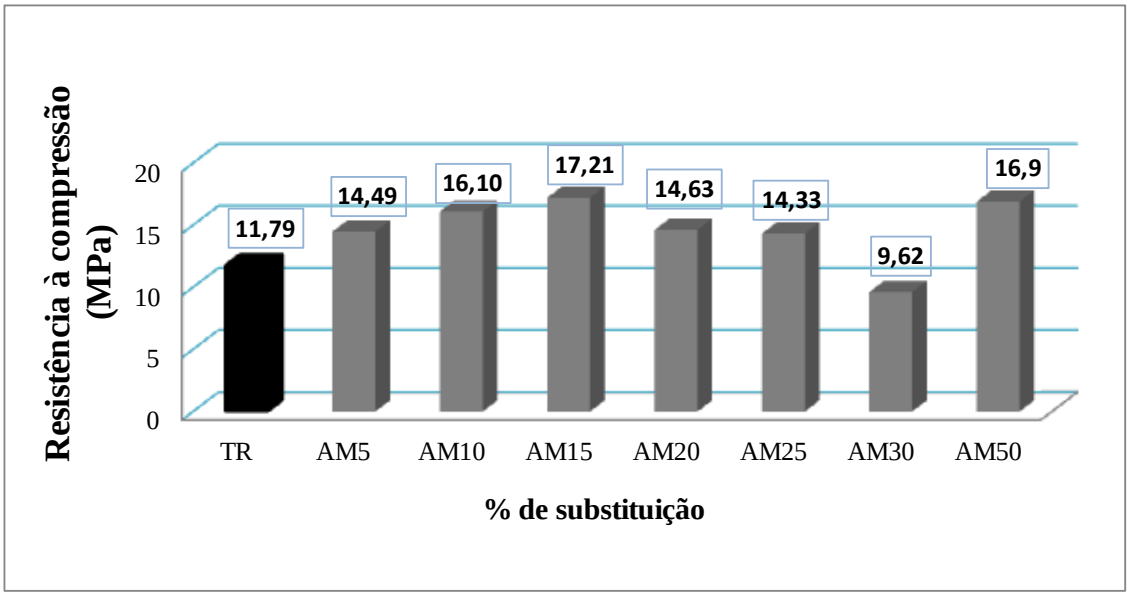
O ensaio de lixiviação foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos - UFRGS, localizada em Porto Alegre-RS. Após o ensaio de resistência à compressão, foram retirados cerca de 200 g de cubos de concreto com a substituição de areia natural sob teor de 50% de areia de fundição (Macharia e Quebra de Canal), para serem analisadas pelo de lixiviação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à compressão - concreto com substituição de areia natural por areia de fundição (macharia)

Os valores obtidos para a idade de 3 dias são ilustrados na Figura 20, conforme as relações dos traços analisados no gráfico, pode-se observar que o único traço que apresentou valor inferior de resistência ao traço de referência (TR) foi a substituição com 30% de areia natural por areia de macharia (AM 30). Os demais traços apresentaram um aumento considerável de resistência, quando comparado ao traço de referência (TR) que tem como resultado 11,79 MPa. O traço que apresentou uma maior resistência dentre todos os traços, foi AM15, chegando a 17,21 MPa.

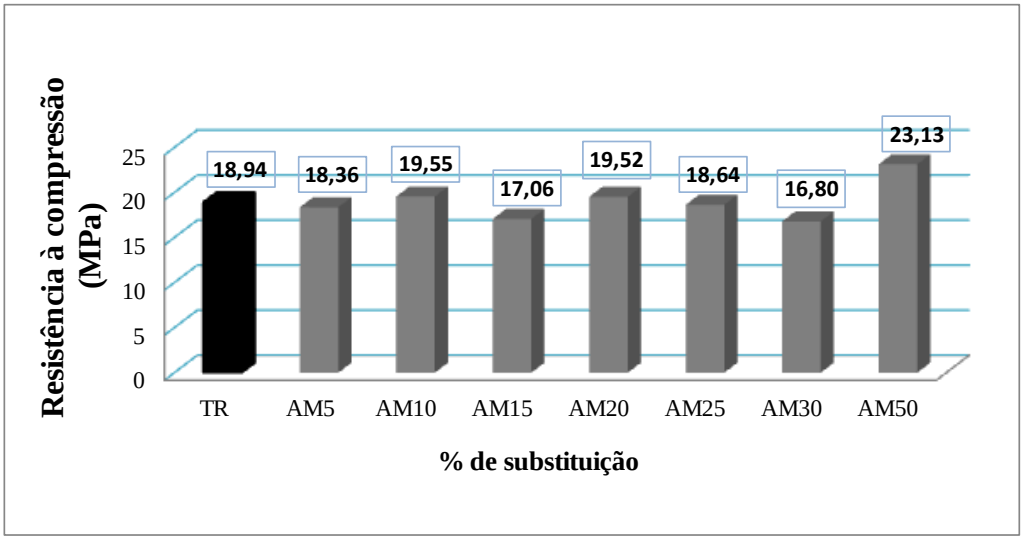
Figura 20- Resistência à compressão aos 3 dias - Areia de Macharia



Fonte: Próprio autor (2014)

Ao analisar a resistência à compressão aos 7 dias, observa-se na Figura 21, que os traços AM5, AM15, AM25 e AM30 apresentaram uma resistência menor que o traço de referência (TR). Porém o traço com 50% de substituição de areia natural por areia de macharia (AM50) obteve uma resistência de 23,13 MPa, um aumento de 4,2 MPa quando comparado ao traço com apenas areia natural (TR).

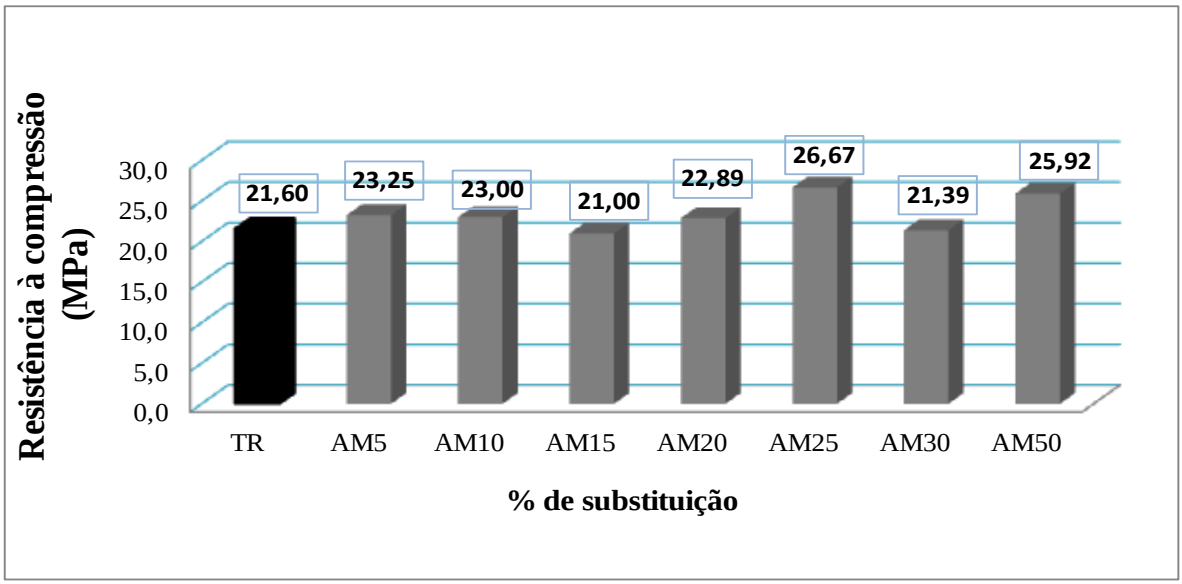
Figura 21- Resistência à compressão aos 7 dias - Areia de Macharia



Fonte: Próprio autor (2014)

A Figura 22 mostra os resultados obtidos para a resistência à compressão aos 14 dias, os traços AM15 e AM30 permaneceram com uma resistência menor que o traço de referência (TR). Os demais traços possuem uma resistência superior ao concreto com apenas areia natural (TR). A substituição com 25% de areia natural por areia de macharia (AM25), apresentou uma resistência de 26,67 MPa, esta, superior quando comparada com os demais traços.

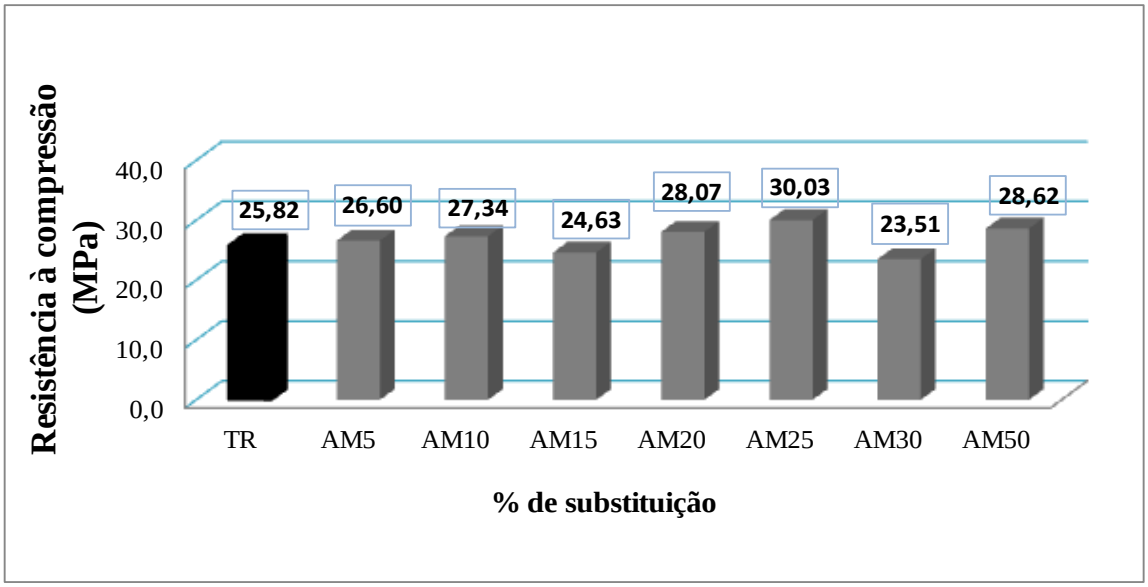
Figura 22- Resistência à compressão aos 14 dias - Areia de Macharia



Fonte: Próprio autor (2014)

Aos 21 dias os traços AM15 e AM30 continuam com uma resistência menor que os demais traços. O traço AM25 teve uma resistência de 30,03 MPa, ou seja, superior ao ser comparado com os demais traços (Figura 23).

Figura 23- Resistência à compressão aos 21 dias - Areia de Macharia



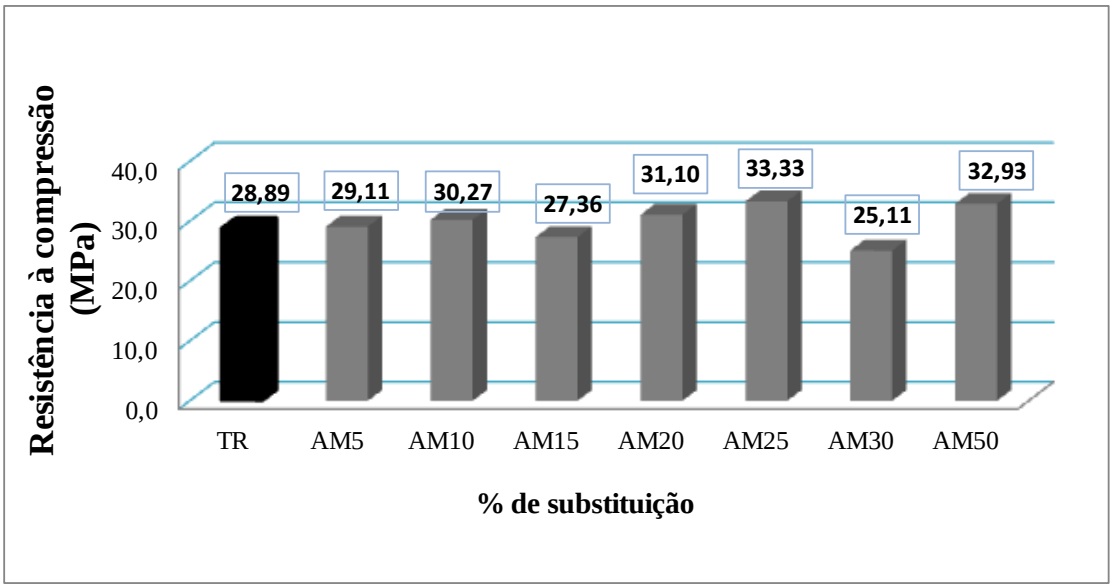
Fonte: Próprio autor (2014)

Aos 28 dias de idade, com um tempo de cura maior, destacou-se o avanço da resistência dos traços. O traço de referência (TR), como previsto para a referida pesquisa obteve uma resistência de 28,89 MPa. Os traços AM15 e AM30 ficaram com uma resistência inferior aos demais traços. A maior resistência alcançada foi com a substituição de 25% de areia natural por areia de macharia (AM25), onde apresentou uma resistência de 33,33 MPa, a diferença deste traço, quando comparado com a substituição de 50% de areia natural por areia de macharia, acaba se tornando pequena pois a mistura AM50 obteve um resultado de resistência à compressão de 32,93MPa.

Analisando-se o gráfico da Figura 24 percebe-se que os traços em diferentes teores de substituição de areia natural por areia de fundição apresentaram uma linearidade e regularidade no crescimento de resistência à compreensão do concreto, acredita-se que este aumento de resistência é significativo quando comparado ao traço de referência (TR). Este aumento de resistência que a areia de macharia trouxe ao concreto, pode ser explicado, por este tipo de areia

possuir grãos mais finos que a areia natural, podendo assim, preencher melhor os vazios dentro do concreto, bem como ajudar na melhor hidratação.

Figura 24- Resistência à compressão aos 28 dias - Areia de Macharia



Fonte: Próprio autor (2014)

4.1.1 Evolução das resistências

Na Tabela 10 estão expostos os valores da resistência a compressão para as idades de 7 e 28 dias e o aumento de resistência adquirido neste período para cada traço de concreto.

Tabela 10- Resultados da resistência à compressão

Traço	Resistência à compressão (MPa)		Aumento de Resistência (%)
	7 dias	28 dias	
TR	18,94	28,89	53
AM5	18,36	29,11	59
AM10	19,55	30,27	55
AM15	17,06	27,36	60
AM20	19,52	31,10	59
AM25	18,64	33,33	79
AM30	16,80	25,11	50
AM50	23,13	32,93	43

Fonte: Próprio autor (2014)

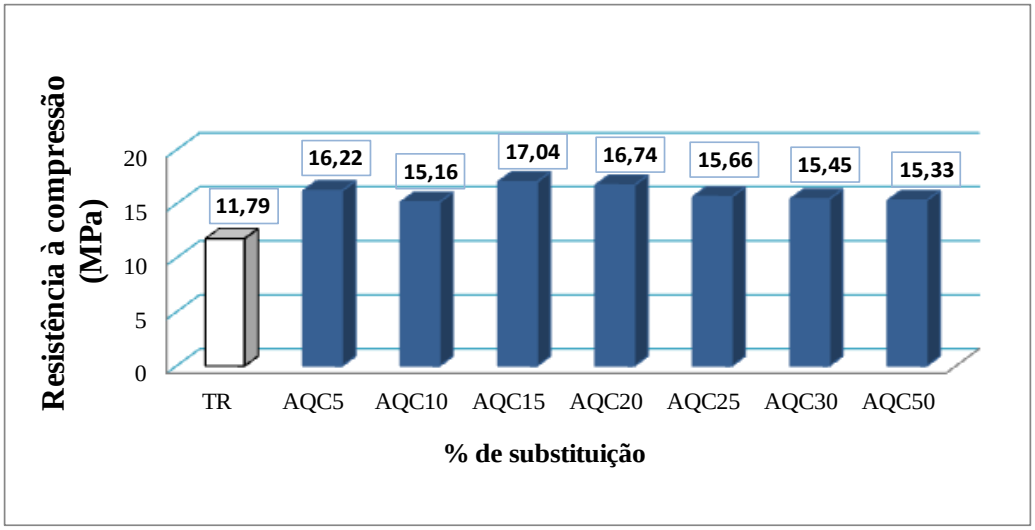
A partir da análise desta tabela, pode-se concluir que os traços com substituição parcial de areia natural por areia de macharia apresentaram aumento de resistência superior ao traço moldado somente com areia natural, e que quanto maior o teor de substituição maior foi o ganho de resistência, exceto a mistura AM30 e AM50 que apresentou respectivamente 50% e 43% de evolução de resistência.

O traço contendo somente areia natural (TR) apresentou uma evolução de resistência de 53%. Já a mistura AM25 para relação entre os 7 e 28 dias, obteve maior ganho de resistência chegando a 79% de evolução. Os traços AM20 e AM15 apresentaram uma evolução de 60%. Esses resultados expressivos do aumento de evolução que a areia de macharia está dando ao concreto podem ser explicados, pois a areia de macharia possui alguns componentes químicos que reagindo com o cimento promovem melhor hidratação do concreto incrementando a resistência do mesmo. Após a idade dos 28 dias os compostos continuam em processo de hidratação, porém a evolução da resistência é em menor intensidade.

4.2 Resistência à compressão - concreto com substituição de areia natural por areia de fundição (quebra de canal)

Na Figura 25 estão ilustrados os valores obtidos para a idade de 3 dias, conforme as relações dos traços analisados no gráfico, pode-se observar que todos as misturas com substituição de areia natural por areia de fundição apresentaram bons resultados nas propriedades mecânicas do concreto. O traço que apresentou uma maior resistência foi AQC15, chegando a 17,24 MPa. Esses resultados mostram que os corpos de prova em seus primeiros dias com a areia de fundição gerado no processo de quebra de canal possui uma diferença expressiva apresentando um aumento considerável de resistência, quando comparado ao traço de referência (TR) que tem como resultado 11,79 MPa.

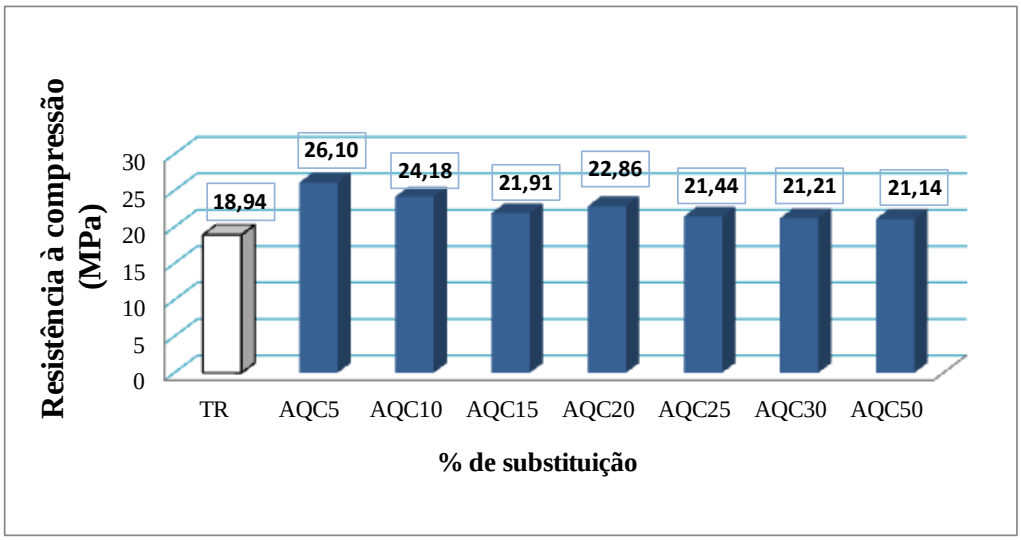
Figura 25- Resistência à compressão aos 3 dias - Areia Quebra de Canal



Fonte: Próprio autor (2014)

Ao analisar a resistência à compressão aos 7 dias, observa-se na Figura 26, que o traço com 5% de substituição de areia natural por areia quebra de canal (AQC5) obteve uma resistência de 26,10 MPa, um aumento de 8,5 MPa quando comparado a mistura natural (TR). A mistura AQC50 com 50% de substituição de resíduo mesmo tendo uma baixa resistência ao ser analisas com os demais traços de substituição, apresentam resultados significativos e maiores que o traço de referência (TR).

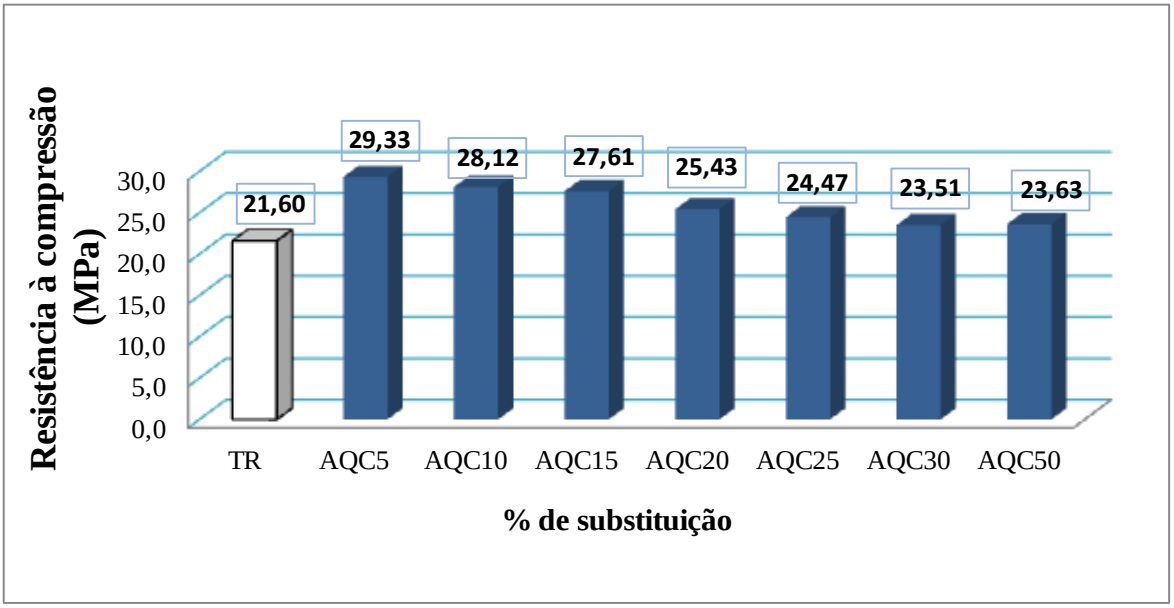
Figura 26- Resistência à compressão aos 7 dias - Areia Quebra de Canal



Fonte: Próprio autor (2014)

A Figura 27 mostra os resultados obtidos para a resistência à compressão aos 14 dias, analisando os gráficos todos os traços com a substituição de resíduo permaneceram com uma resistência maior que o traço de referência (TR). A substituição com 5% de areia natural por areia quebra de canal (AQC5), apresentou uma resistência de 29,33 MPa, esta, superior quando comparada com os demais traços.

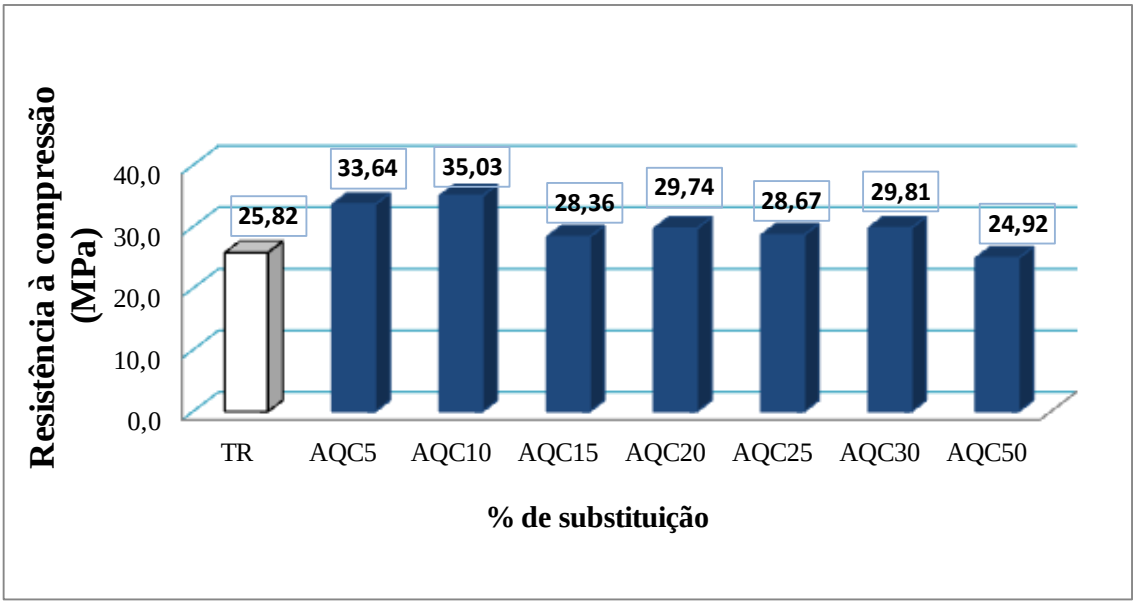
Figura 27- Resistência à compressão aos 14 dias - Areia Quebra de Canal



Fonte: Próprio autor (2014)

Aos 21 dias as misturas com substituição de areia natural por areia de quebra de canal continuam apresentando uma resistência maior que o traço de referência (TR), exceto o traço AQC50 que teve como resultado 24,92 MPa. O traço AQC10 teve uma resistência de 35,03 MPa, ou seja, superior ao ser comparado com os demais traços (Figura 28).

Figura 28- Resistência à compressão aos 21 dias - Areia Quebra de Canal



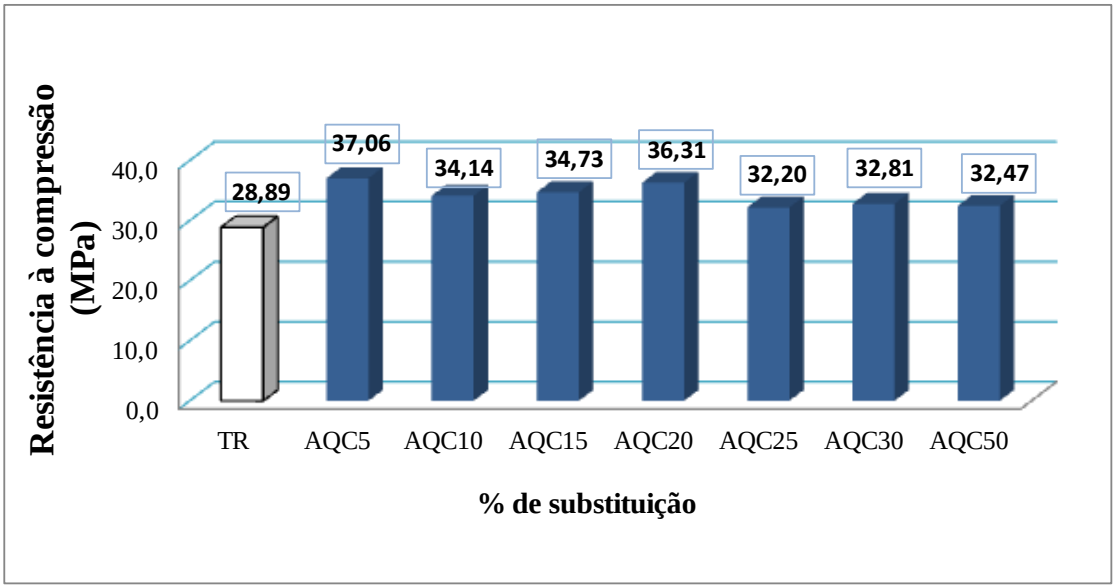
Fonte: Próprio autor (2014)

Com um tempo de cura maior, aos 28 dias de idade destacou-se o avanço da resistência dos traços. O traço de referência (TR), como previsto para a referida pesquisa obteve uma resistência de 28,89 MPa. A maior resistência alcançada foi com a substituição de 5% de areia natural por areia quebra de canal (AQC5), onde apresentou uma resistência de 37,06 MPa. A mistura AQC 50 com substituição de 50% de areia natural por areia quebra de canal teve como resultado 32,47, um aumento de 4 MPa quando comparado com o traço de referência (TR).

Analisando o gráfico da Figura 24 os traços em diferentes teores de substituição de areia natural por areia de fundição apresentaram uma linearidade e regularidade constante no crescimento de resistência à compreensão do concreto, acredita-se que este aumento de resistência é bastante significativo quando comparado ao traço de referência (TR).

A areia quebra de canal possuiu grãos mais finos, com menos variações de tamanho, ou seja, os grãos são mais uniformes que a areia natural, podendo assim, preencher melhor os vazios dentro do concreto, bem como ajudar na melhor hidratação e aumentar a resistência do mesmo.

Figura 29- Resistência à compressão aos 28 dias - Areia Quebra de Canal



Fonte: Próprio autor (2014)

4.2.1 Evolução das resistências

A Tabela 10 apresenta os valores da resistência a compressão para as idades de 7 e 28 dias e o aumento de resistência adquirido neste período para cada traço de concreto.

Tabela 11- Resultados da resistência à compressão

Traço	Resistência à compressão (MPa)		Aumento de Resistência (%)
	7 dias	28 dias	
TR	18,94	28,89	53
AQC5	26,10	37,06	42
AQC10	24,18	34,14	41
AQC15	21,91	34,73	59
AQC20	22,86	36,31	59
AQC25	21,44	32,20	53
AQC30	21,21	32,81	55
AQC50	21,14	32,47	54

Fonte: Próprio autor (2014)

De acordo com a análise realizada a partir da tabela a cima, pode-se concluir que os traços com substituição parcial de areia natural por areia quebra de canal apresentaram um aumento de resistência superior ao traço moldado somente com areia natural, e que quanto maior o teor de substituição maior foi o ganho de resistência, exceto para as misturas AQC5 e AQC10 que obtiveram uma evolução respectivamente de 42% e 41% de resistência.

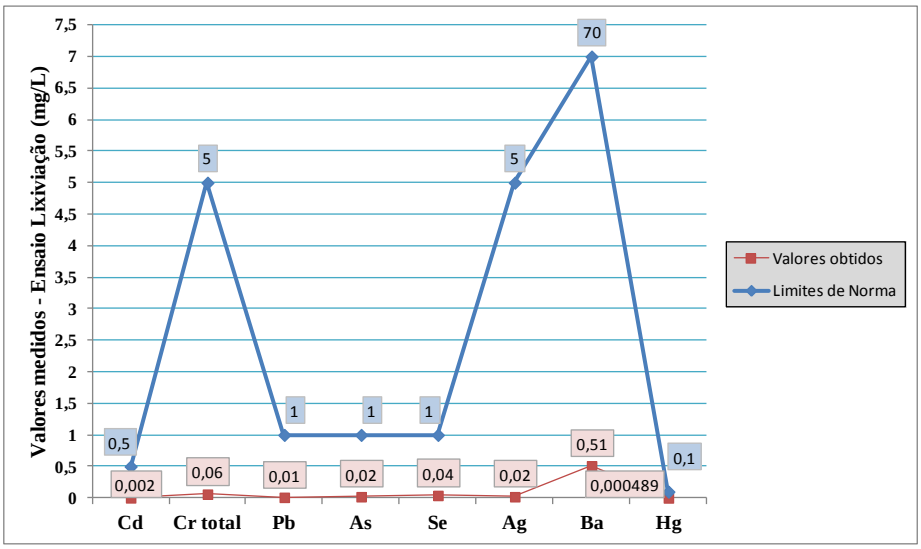
O traço contendo somente areia natural (TR) apresentou uma evolução de resistência de 53%. A mistura AQC15 e AQC20 para relação entre os 7 e 28 dias, obtiveram maior ganho de resistência chegando a 59% de evolução. Os traços AQC30 e AQC50 apresentaram uma evolução de 55% e 54%. Esses dados obtidos do aumento de evolução de resistência, que a areia quebra de canal causou ao concreto podem ser explicados, pois a areia quebra de canal possui alguns componentes químicos que reagindo com o cimento, podem vir a promoverem uma avanço de hidratação do concreto, afetando na resistência do mesmo.

4.2 Lixiviação

Para o ensaio de lixiviação, foi escolhida a mistura com 50% de substituição de areia natural por areia de fundição (macharia e quebra de canal). Essa opção foi realizada devido aos bons resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. Vale resaltar que ambos os traços (AM50 e AQC50) obtiveram um ganho de resistência, quando comparado com o traço de referência (TR).

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos do ensaio de lixiviação para a mistura de 50% de substituição de areia natural por areia de macharia. Ao analisar os dados obtidos o elemento químico que mais se sobressaiu foi o Bário (Br) com 0,51 mg/L, logo após vêm o Cromo (Cr) com 0,06 mg/L. É importante ressaltar que nenhum elemento químico ultrapassou os valores permitidos pela NBR 10004 (1987), Classifica-se desta forma como **Resíduo Não Perigoso Classe II**.

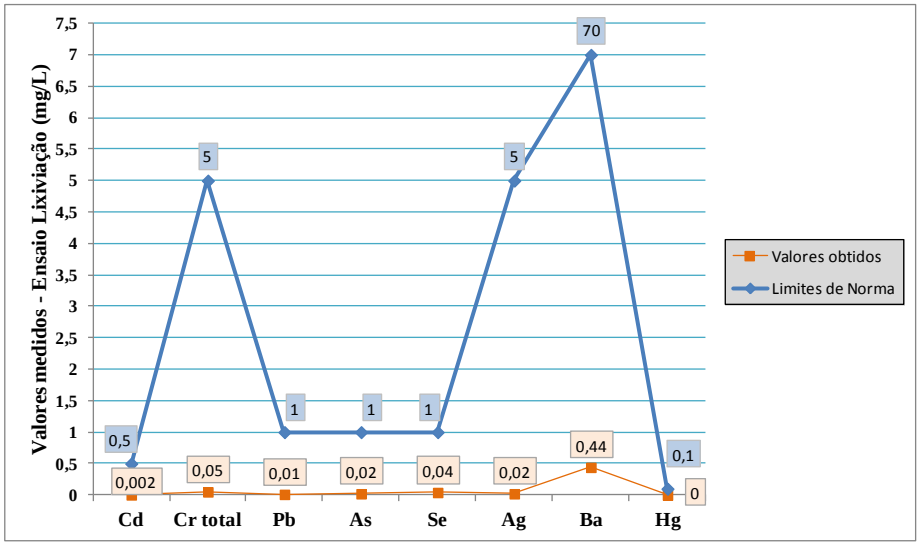
Figura 30- Ensaio lixiviação para o traço AM50



Fonte: Próprio autor (2014)

Na Figura 29 estão apresentados os resultados obtidos do ensaio de lixiviação para a mistura de 50% de substituição de areia natural por areia quebra de canal. Através dos dados obtidos o elemento químico que mais se sobressaiu no ensaio foi o Bário (Br) com 0,44 mg/L, logo após vêm o Cromo (Cr) com 0,05 mg/L, o Mercúrio (Hg) não apareceu na mistura analisada. O traço AQC50 classifica-se desta forma como **Resíduo Não Perigoso Classe II**, pois nenhum elemento químico ultrapassou os valores permitidos pela NBR 10004 (1987),

Figura 31- Ensaio lixiviação para o traço AQC50



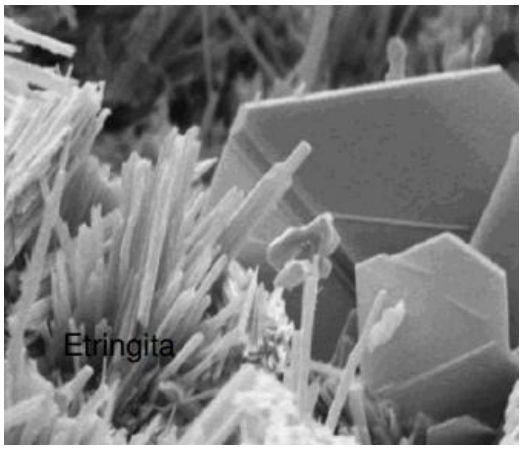
Fonte: Próprio autor (2014)

O Anexo C apresenta o laudo da classificação destas misturas, realizadas no laboratório de materiais cerâmicos da UFRGS.

4.3 Discussão do ensaio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é um ensaio de extrema importância para a analisar a microestrutura do concreto, pois assim pode-se verificar as fases que se formam após a hidratação dos compostos cimentícios e os compostos formados. A Figura 32 apresenta a microscopia com do concreto com os compostos formados.

Figura 32- Microscopia do concreto

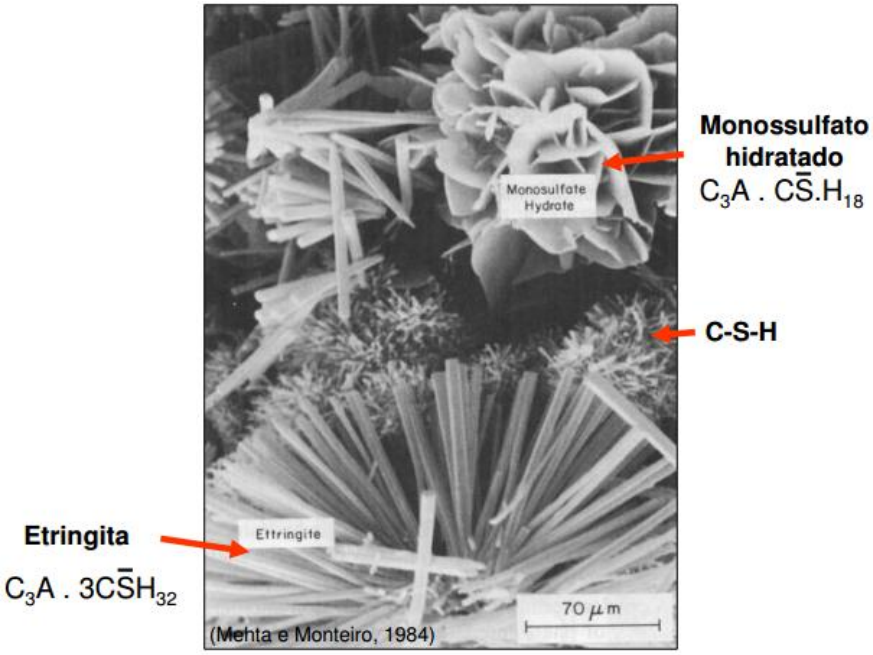


Fonte: Mehta e Monteiro (1984)

Dentre os principais compostos formados estão o Hidróxido de Cálcio (C-H) , são cristais de grande tamanho, com formas hexagonais, que ocupam 20 a 25% do volume de sólidos. Estes cristais são geralmente em formato de placas hexagonais e são os responsáveis pelo pH elevado da pasta (pH ≅ 13). É quimicamente muito reativo, são porosos com baixa resistência mecânica.

A etringita são cristais em formato de agulhas e formam-se nas primeiras horas de hidratação, sendo que as agulhas se intertravam e prendem muita água. Prejudicam a trabalhabilidade e causam um falso pega. As figuras 33 apresentam a etringita.

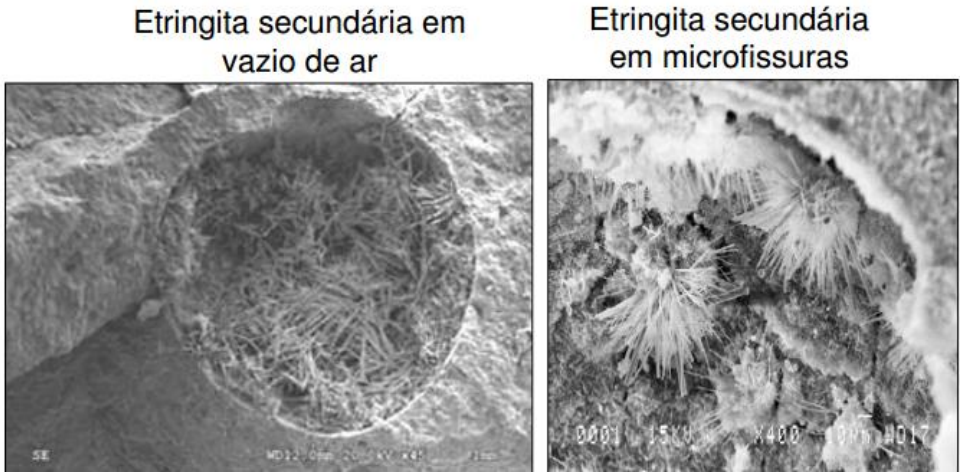
Figura 33- Etringita no concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (1984)

A etringita secundária forma-se na presença de umidade no concreto já endurecido, pois a etringita recristaliza em cristais maiores dentro dos vazios. A figura 34 apresenta a etringita secundária.

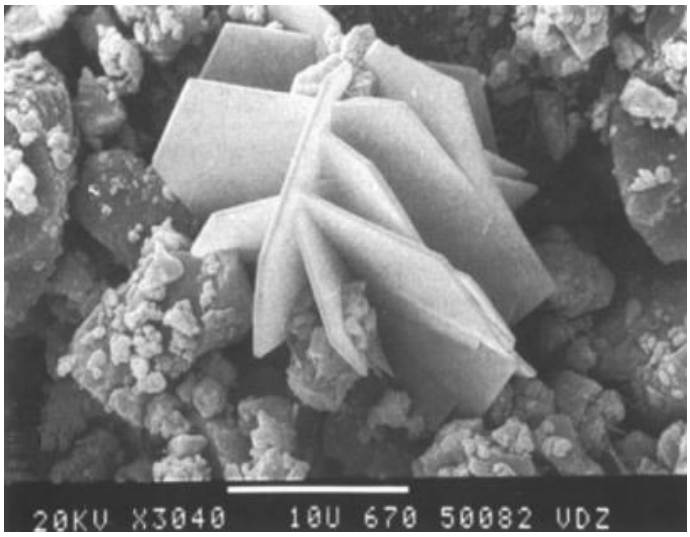
Figura 34- Etringida secundária



Fonte: Heumann e Moraes (2005)

A etringita é instável e se transforma em cristais de monossulfato, conforme a figura 35.

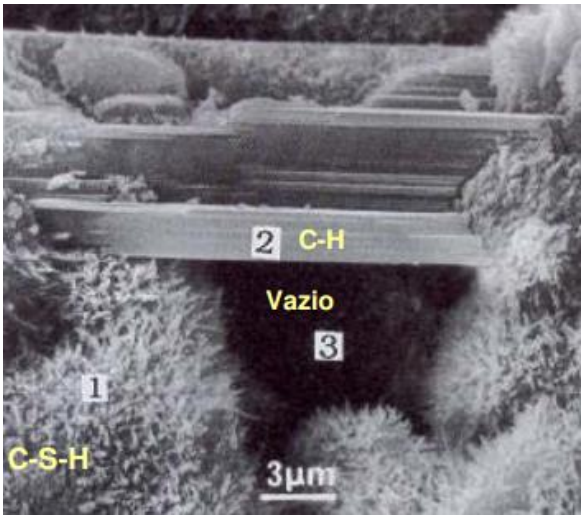
Figura 35- Microscopia do concreto - monossulfato



Fonte: Griesser (2002)

Os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) são estruturas unidas através de ligações de van der Waals, possuem excelente resistência mecânica e química e ocupam 50 % a 60% do volume da pasta (Figura 35).

Figura 36- Microscopia do concreto – C-S-H



Fonte: Moranville (1992)

4.3.1 Resultados das análises da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para o ensaio de microscopia, foi escolhida a mistura com 50% de substituição de areia natural por areia de fundição (macharia e quebra de canal) e o traço de referência (TR). Essa opção foi realizada devido aos bons resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. Vale resaltar que ambos os traços (AM50 e AQC50) obtiveram um ganho de resistência, quando comparado com o traço de referência (TR).

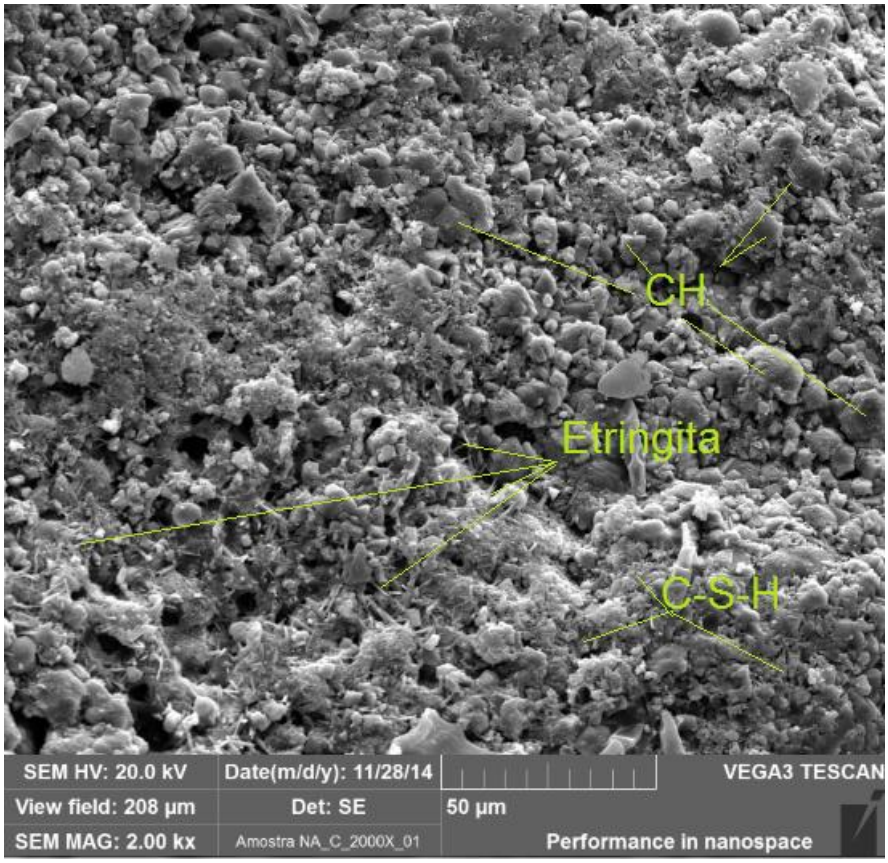
Foram adotados os seguintes traços para a análise:

- TR → Concreto Natural Referência (100% de areia natural);
- AM50 → 50% de areia de fundição sem beneficiamento (Macharia);
- AQC → 50% de areia de fundição com beneficiamento (Quebra de Canal);

Os principais compostos do cimento são o C3S, C2S, C3A e C4AF. No momento que adiciona-se água ao cimento, o primeiro composto a reagir é o C3A, que age como fundente na mistura. O C3A, que é o responsável pela resistência em idades iniciais, irá reagir de maneira predominante até os 7 dias, sendo que devem-se tomar precauções em cimentos com elevados teores de C3S, visto que o calor de hidratação é muito elevado e pode gerar fissuras. Após os 28 dias a reação química predominate é a do C2S, responsável pelas resistências em idades mais elevadas. O C4AF atua na fase intersticial do clínquer. O gesso, que é um quinto elemento no cimento, atua como regulador do pega.

A Figura 37 apresenta a microscopia na ampliação 50 μm do TR aos 28 dias.

Figura 37- Microscopia do concreto – TR, 50 µm aos 28 dias

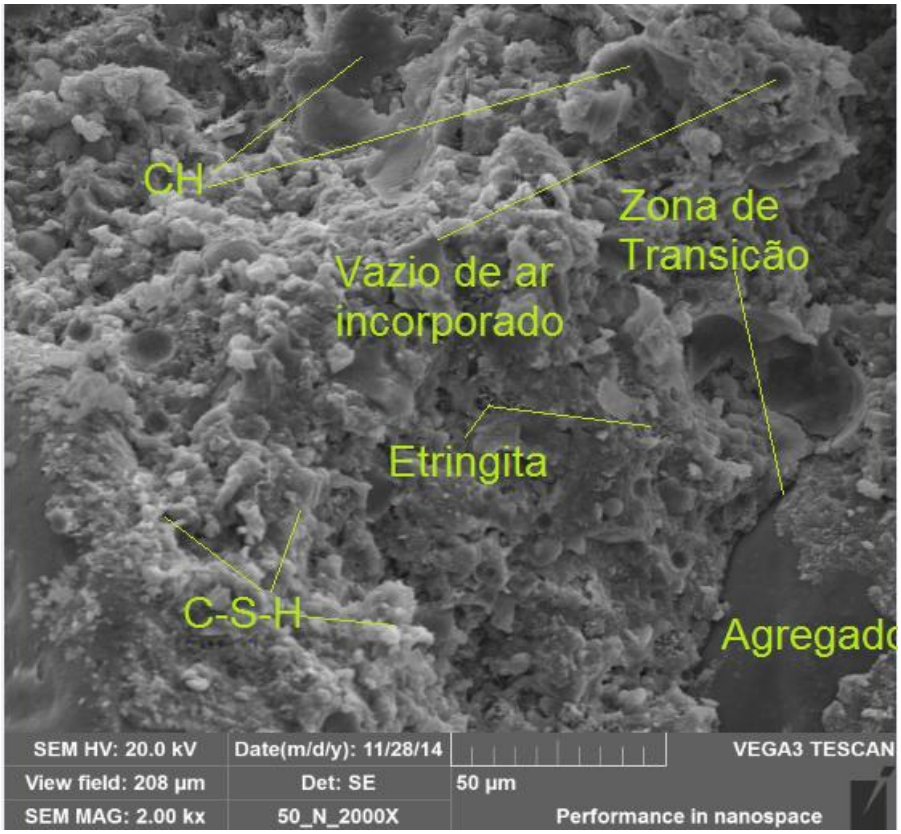


Fonte: Próprio autor (2014)

Através da Figura 37 observa-se, em função da escala de ampliação, os cristais (agulhas) de etringita, os grumos de C-S-H, e o e os cristais (em formato de placas) do CH. Como os ensaios ocorreram aos 28 dias, não houve a de maneira significativa a parcela de contribuição do C2S na formação do C-S-H. Em função do grau de ampliação utilizado, não se pode verificar detalhadamente os cristais individuais, apenas os grupos apresentados na Figura 36.

A Figura 38 apresenta a microscopia na ampliação 50 µm do AM50, ou seja, com 50% de macharia. Observa-se que em relação a figura 37, houve um refinamento da pasta, com formação de uma número mais elevados de cristais, principalmente grumos de C-S-H. Esse aumento dos cristais elevou os níveis de resistência a compressão pois houve reação entre a areia de fundição (macharia) e o CH, promovendo a criação de C-S-H secundários.

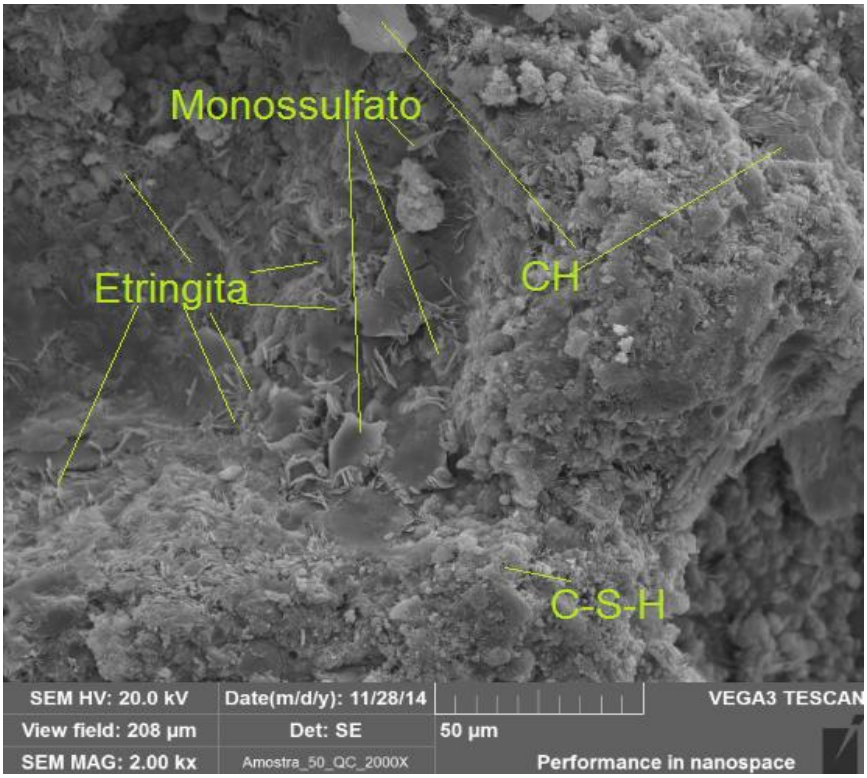
Figura 38- Microscopia do concreto – AM50, 50 µm



Fonte: Próprio autor (2014)

Na Figura 39 apresenta a microscopia na ampliação 50 µm do AQC50, ou seja, com 50% de Quebra de Canal. Observa-se que em relação ao traço de referência (TR) e a mistura AM50, houve um refinamento da pasta, com formação de uma número mais elevados de cristais, principalmente grumos de C-S-H. Esse aumento dos cristais elevou os níveis de resistência a compressão pois houve reação entre a areia de fundição beneficiada e o CH, promovendo a criação de C-S-H secundários. Outro ponto relevante são o número elevado de etringita, que transformam-se em monosulfatos. O traço AQC50 apresentou o maior nível de resistência entre todos os testados.

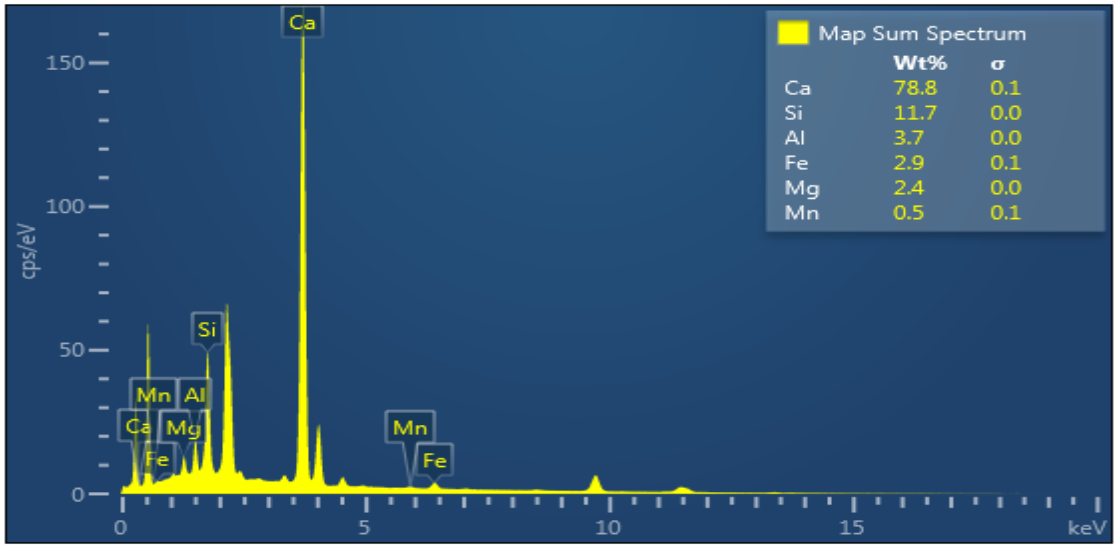
Figura 39- Microscopia do concreto – AQC50, 50 µm aos 28 dias



Fonte: Próprio autor (2014)

A Figura 40 apresenta o Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) para a mistura TR aos 28 dias.

Figura 40- EDS traço de referência (TR)

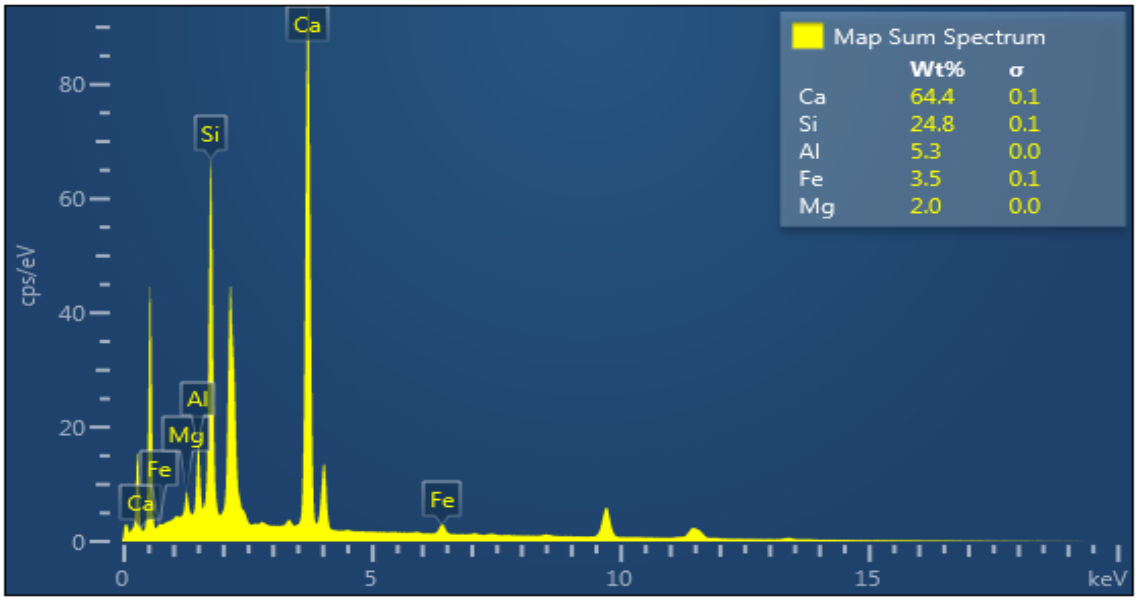


Fonte: Próprio autor (2014)

De acordo com a Figura 40 observa-se que os picos máximos foram de Sílicio e Cálcio, respectivamente. Como os picos são estreitos e longos, trata-se de uma microsestrutura. Caso os picos fossem largos e estreitos, seria uma macroestrutura.

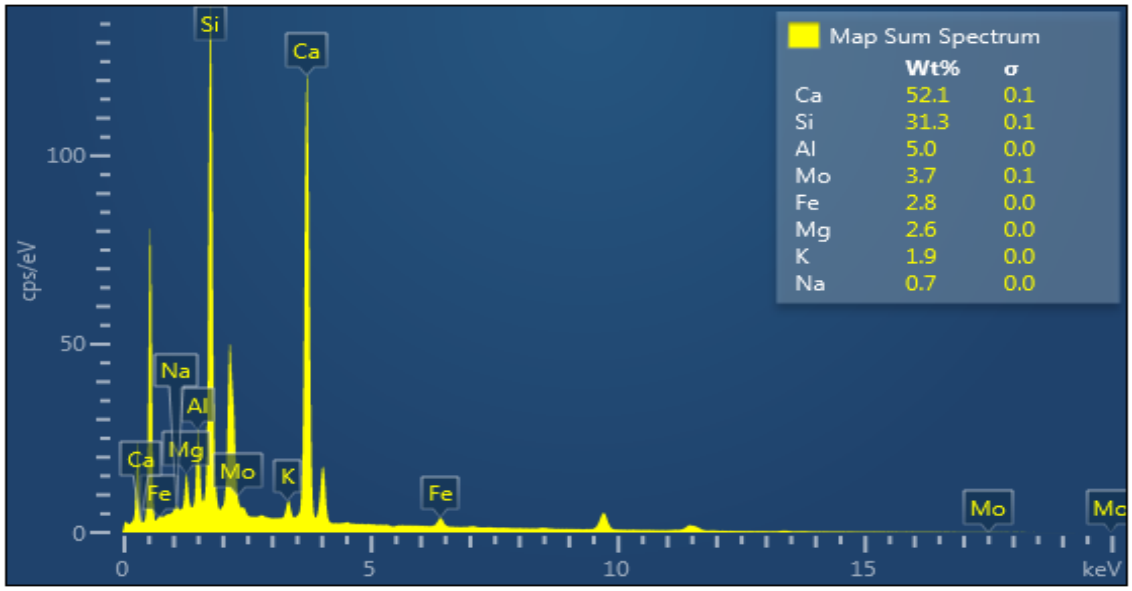
A Figura 41e 42 apresenta o EDS, para a mistura AM50 e AQC50 aos 28 dias de idade.

Figura 41- EDS para a mistura AM50



Fonte: Próprio autor (2014)

Figura 42- EDS para a mistura AQC50



Fonte: Próprio autor (2014)

Analisando-se as Figuras 40, 41 e 42, observa-se que a presença de sílicio aumentou significativamente da mistura TR para a mistura AM50. Como as reações de hidratação foram mais intensas para a mistura AM50, que apresentou as maiores resistências, os picos de silício foram maiores, pois estes representam o C-S-H. Comparando-se as misturas TR e AQC50, observa-se que os picos de silício aumentaram e os picos de cálcio diminuíram, pois a reação química da areia de fundição beneficiada consome o CH, formando C-S-H menores, aumentando os níveis de resistência.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou avaliar a substituição de areia natural por areia de fundição (macharia e quebra de canal) em teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 50% no concreto, analisando suas propriedades mecânicas, a microestrutura e lixiviação em comparação ao concreto de referência moldado somente com areia natural.

Partindo do questionamento proposto para a realização desta pesquisa, pode-se concluir através dos resultados obtidos, que a influência da substituição do areia natural por areia de fundição (macharia e quebra de canal) se dá através dos seguintes tópicos:

5.1 Quanto à resistência à compressão

Constatou-se que todos os traços com a areia de fundição (macharia e quebra de canal), desde as primeiras idades do concreto, apresentaram valores maiores de resistência à compressão axial em comparação ao traço de referência, ou seja, moldado somente com areia natural.

Observou-se também, que mesmo substituindo teores maiores de areia natural pela areia de fundição, os valores de resistência à compressão para os concretos mantiveram regularidade. Este dado é importante, pois a preocupação no inicio da pesquisa era que a substituição deste resíduo por areia natural pudesse causar grandes variações de resistência, dificultando o entendimento dos resultados.

Com um tempo de cura maior, aos 28 dias de idade, todas as substituições realizadas de areia natural por areia de macharia e areia quebra de canal, obtiveram resultados significativos de resistência, superior ao traço de referência.

Acredita-se que o teor máximo de substituição seja 50% de areia de fundição, a partir disso, dificultaria a trabalhabilidade do concreto, podendo diminuir as propriedades mecânicas do mesmo.

5.2 Quanto à aparência dos corpos-de-prova e lixiviação das mistura AM50 e AQC50

Quanto à aparência superficial dos corpos de prova de concreto, não ficou comprometida em função da substituição da área natural pela areia de fundição, não havendo nenhuma mudança de coloração e manchas nas superfícies dos mesmos, mantendo assim, uma excelente aparência.

A classificação e caracterização das misturas AM50 e AQC, se apresentou dentro dos limites permitidos pela ABNT NBR 1004(2004). No ensaio de lixiviação os parâmetros satisfazem os limites permitidos, e a amostra apresentou-se como NÃO TÓXICO, ao meio ambiente.

5.3 Quanto à microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os ensaios de MEV se mostraram como uma ferramenta de significativa utilidade para a avaliação dos resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão, permitindo através de sua análise, a confirmação visual daquilo que tinha sido constatado. Os resultados obtidos confirmam que a utilização da areia de fundição tanto da areia de macharia como na de quebra de canal no concreto provoca mudanças microestruturais

Observou-se que na mistura AM50, a areia de macharia reagindo com os componentes do concreto causou o refinamento da pasta, formando um número mais elevados de cristais, esses cristais promoveram um aumento de resistência aos 28 dias de idade.

Para a mistura AQC50, houve um aumento mais elevado de cristais, quando comparado ao traço de referência (TR) e a o própria mistura AM50, pois houve reação entre a areia de fundição beneficiada e o CH, promovendo a criação de C-S-H secundários, aumentando consideravelmente aos 28 dias a resistência do concreto.

Com todos os resultados obtidos e analisados, conclui-se que é extremamente viável a utilização deste resíduo industrial em concretos, ainda leva-se em consideração que o reaproveitamento além de ser uma ótima alternativa para a diminuição do impacto ambiental, é uma solução economicamente vantajosa para a indústria de fundição, já que as empresas são responsáveis por descartar esses resíduos e pagam um preço alto para a manutenção dos aterros industriais. Já para a indústria da construção civil a produção do concreto com a substituição da areia natural por areia de fundição, também tendem a ter um custo menor, uma vez que o

fabricante deve pagar menos pela matéria-prima, sendo este, um valor simbólico, ou até mesmo sem nenhum custo, já que a indústria de fundição gera uma grande quantidade desse resíduo.

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

- Analisar a viabilidade econômica em produção em grande escala;

- Analisar o uso de areia de fundição em concreto armado.

REFERÊNCIAS

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS. **Panorama das Estimativas de Geração de Resíduos Sólidos**, São Paulo, 2003. Disponível em: < http://www.abetre.org.br/biblioteca/publicacoes/publicacoes-abetre/FGV%20-%20Panorama%20das%20Estimativas%20de%20Ger.%20de%20Res.%20Industriais%20-%20Rel.%20Final.pdf >. Acesso em: 10 abril. 2014.

Albrecht Equipamentos Industriais: **Regeneração de areias ligadas quimicamente por processo ecologicamente correto.** Disponível em: < http://www.albrecht.com.br/pt-br/default.php?go=nov-5-7-06-areias > Acesso em: 4 mar. 2014.

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. Controle tecnológico básico do concreto. **Neape Nucleo de ensino e pesquisa da alvenaria estrutural,** Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP, 2002. Disponível em:<http://www.nepae.feis.unesp.br/Apostilas/Controle%20tecnologico%20basico%20do%20concreto.pdf>. Acesso em: 20 abril. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONCRETAGENS. Informação sobre o concreto dosado em central. Disponível em: <http://www.abesc.org.br>. Acesso em: 7 mar. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO – COMISSÃO DE MEIO AMBIENTE. **Manual de Regeneração e Reuso de Areias de Fundição**. São Paulo,1999, 1-49 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10.004**. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 1987. 33 p.

_____. NBR 11579: Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira 200. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

_____. NBR NM 248: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001. 5p.

_____. NBR 15702: Areia descartada de fundição - diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009. 5p.

_____. NBR 5738: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 5739: Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – especificações. Rio de Janeiro, 2009. 7p.

_____. NBR 7217: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001. 5p.

_____. NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por

meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 2003. 8p

_____. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1998. 4p.

_____. NBR NM 53: Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2002; 4p.

_____. NBR NM 65: Cimento Portland - determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002. 6p.

_____. NBR NM 67: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996. 11p.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão (Org), **Materiais de construção**, 5°ed. Rio de Janeiro: editora LTC, 2000, V1, 471p.

BONET, Ivan Ideraldo. **Valorização do resíduo areia de fundição (RAF): incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.** 2002. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2002.

BORBA, José Tavares. **Análise da eficiência técnica das linhas de produção de blocos e cabeçotes da Tupy Fundições**. 2004. 81f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal de Santa Catarina , Florianópolis, 2004.

Brasil Sustentável. **Programa de educação ambiental para a sustentabilidade.** Disponível em: < http://brasilsustentaveleditora.com.br/programa>. Acesso em: 22 abril. 2014.

CIMENTO. **Wikipédia a Enciclopédia Livre.** [Sl, Sd], disponível em:< http://pt.wikipedia.org/wiki/Cimento>. Acesso em: 10 abr. 2014.

COUTINHO, Benedito Neto. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. 2004. 261 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

DANTAS, José. **Montagem, comissionamento e operação de um Sistema de Recuperação de Areia de Fundição**: Regenerador Térmico - Plano de Trabalho da Fase II. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2003.

DUART, Marcelo Adriano. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento.** 2008. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Centro de Tecnologia – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003. SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio.** Rio de Janeiro: IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo, 1993.

FOGUESATTO, André Frederico**. Estudo da utilização de areia residual do processo de fundição como agregado graúdo para concreto.** 2007. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. **Relatório sobre a geração de resíduos sólidos industriais no estado do Rio Grande do Sul**, Rio Grande do Sul, 2003.

GOLDEMBERG, José; AGOPYAN Vahan; JOHN Vanderley. **O desafio da sustentabilidade na construção civil.** São Paulo, Blucher, 2012. 15p. il. (Série Sustentabilidade, v.5)

GOSSEN, Marcell. **Programa de gerenciamento de resíduos sólidos industriais:** Proposta de um procedimento e aplicação. 2005. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau Centro de Ciências Tecnológicas – Blumenau, 2005.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini; 1992. 340 p.

HELENE, Paulo; TIBÉRIO, Andrade. Concreto de Cimento Portland. In: Geraldo Cechella Isaia (org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais,** cap.29. São Paulo: Ibracon, 2010. Disponível em: <http://www.concretophd.com.br/imgs/files/ConcretoCap27Materiais2010.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2014.

IABCAMPINAS**. Resíduos da construção civil.** Disponível em: < http://www.iabcampinas.org.br/residuos-da-construcao-civil/#!/> Acesso em: 11 abril. 2014

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO - IBRACON. Concreto: material construtivo mais consumido no mundo. Revista Concreto e Construções, São Paulo, v . XXXVII, n. 53, p. 1 – 80, mar. 2009. Disponível em:

<http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf >. Acesso em: 20 abril. 2014.

JACQUES, Jeovani Rodrigues. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de concreto reciclado como agregado graúdo em concreto de cimento Portland.** 2013. 63 f**.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijui, 2013.

LIMA, Geannina Terezinha dos Santos Lima; GHISLENI,Geisiele; POZZOBON, Cristina Eliza; LOPES, Diorges; PUFAL, Lucas; AMARAL, Mariana Bamberg. **Estudo para utilização de areia de fundição em blocos e pisos de concreto.** 56º IBRACON, Natal - RN, 2014.

KELM, Tamile Antunes. **Análise da resistência e microestrutura em concretos com substituição parcial de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz.** 2011. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2011.

KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez. **Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através da incorporação a solos argilosos.** 2008. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

KNOP, Wanessa Rejane**. Estudo da viabilização da incorporação do pó de exaustão em massa cerâmica.** 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Estado de Santa Catarina Centro de Ciências Tecnológicas – Joinville, 2009.

LOPES, Luiz Rogério Natividade. **Avaliação da redução dos resíduos sólidos de areia resinada em fundição de aço através de recuperação térmica.** 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

MEHTA, Providar Kumar.; MONTEIRO, Paulo . **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Reciclar os resíduos da construção civil proporciona lucro ambiental.** Disponível em: < http://www.mma.gov.br/informma/item/9736-reciclar-os-residuos-da-construcao-civil-proporciona-lucro-ambiental>. Acesso em: 17 abril. 2014.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997. 150 p.

PABLOS, Javier Mazariegos; SICHIERI Eduvaldo Paulo; IZELI Rafaela Lino. Reutilização de resíduo sólido industrial, constituído por areias de fundição, na fabricação de tijolos maciços e peças decorativas. **Revista RISCO**, São Paulo, v. 10, n. 150, p. 112- 150, setembro. 2009.

Disponível em: < http://www.revistas.usp.br/risco/article/view/44784 >. Acesso em: 19 mar. 2014

PEIXOTO, Fabiano. **Regeneração térmica de areia ligada quimicamente.** 2003. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos Avancados). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.

PICHAT, Philippe. **A Gestão dos resíduos**. 1ed. Portugal: Instituto Piaget – Lisboa, 1998. 11p.

RAMPAZZO, Doris et al. R**esinas sintéticas para fundição**. São Paulo: Editora Ltda, 1989.

ROCCA, A.C.C et al. **Resíduos Sólidos Industriais**. CETESB, 2ª Ed. São Paulo, 1993.

SCHEUNEMANN, Ricardo. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton.** Dissertação de Mestrado – Curso Engenharia Química - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2005.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos da construção civil e o estado de São Paulo.** São Paulo, 2012. Disponível em: < http://www.sindusconsp.com.br/envios/2012/informativo/residuos/residuos_construcao_civil_sp.pdf > Acesso em: 26 abril. 2014.

Sistema de Submissão de Teses e Dissertações Eletrônicas: **Tede simplificado**. Disponível em: < http://www.tede.udesc.br/>. Acesso em: 20 fev. 2014.

SOARES, Gloria de Almeida. F**undição: mercado, processos e metalurgia.** Rio de Janeiro: COPPI/UFRJ, 2000. 53 p.

STOLF, Bruno Francisco Pimentel. **Projeto de processo para recuperação de areia fenólica utilizada na fabricação de machos e moldes na indústria de fundição e para fabricação de blocos e bloquetes.** 5º Simpósio de Ensino de Graduação, 2007. Disponível em <www.unimep.com.br>. Acessado em: 29 mar. 2014

ANEXO A

ANEXO B

ANEXO C