

DÉBORA FERREIRA DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS DE AREIA DE UMA FUNDIÇÃO E
SUA INCORPORAÇÃO EM ARGAMASSA DE CIMENTO

Dissertação apresentada como requisito
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Área de Concentração
Saneamento.

Orientador: Profa. Dra. Maria Lúcia
Pereira Antunes



Bauru
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Débora Ferreira.

Caracterização dos finos de areia de uma fundição e sua incorporação em argamassa de cimento / Débora Ferreira de Oliveira, 2014
70 f.

Orientador: Maria Lúcia Pereira Antunes

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2010

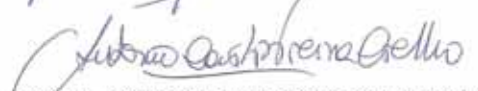
1. Argamassa de cimento. 2. Cimento Portland. 3. Resíduos de Fundição. 4. Areias descartadas de fundição. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DEBORA FERREIRA DE OLIVEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Ao 01 dia do mês de agosto do ano de 2014, às 14:00 horas, no(a) CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SOROCABA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES do(a) Departamento de Engenharia Ambiental/ Unidade de Sorocaba, Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI do(a) Departamento de Engenharia Ambiental/ Unidade de Sorocaba, Prof. Dr. ANTONIO CARLOS VIEIRA COELHO do(a) Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais / Escola Politécnica Da Usp, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DEBORA FERREIRA DE OLIVEIRA, intitulada "CARACTERIZAÇÃO DOS FINOS DE AREIA DE UMA FUNDIÇÃO E SUA INCORPORAÇÃO EM ARGAMASSA DE CIMENTO". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Profa. Dra. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES


Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI


Prof. Dr. ANTONIO CARLOS VIEIRA COELHO

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio e Maria Luiza, minha filha Anna Clara e meu
esposo Danilo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades que colocou em meu caminho.

Ao meu pai Antonio, que sempre esteve presente e ativo em cada momento da minha vida e em especial na execução deste trabalho, permitindo que ele fosse realizado.

À minha mãe Maria Luiza, pelo apoio e cuidado quando precisei e pelas palavras que sempre me encorajaram à nunca desanimar.

Ao meu esposo Danilo, pelas dicas, paciência e amor incondicional, mesmos nos momentos mais difíceis, sua presença sempre fará diferença.

À minha filha Anna Clara, que mesmo pequena colaborou como pôde para este trabalho, meu carinho e respeito eternos.

À minha orientadora Profa. Dra. Maria Lúcia Pereira Antunes, pelo apoio e confiança a mim depositados.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista pela oportunidade que me foi concedida. Agradeço também aos docentes que me acompanharam ao longo do curso, em especial Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini e Prof. Dr. Alexandre Marco da Silva.

Aos profissionais do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) do Grupo de Plasmas e Materiais da UNESP-Sorocaba, pela colaboração e apoio durante os ensaios de caracterização.

À empresa Supermix-Sorocaba, pelo apoio nos ensaios de compressão e dicas durante a execução deste trabalho.

Aos profissionais da empresa Metso Brasil, em especial do Laboratório de Areias e de Meio Ambiente, pelas orientações técnicas e pareceres.

Ao Prof. Dr. Jonas Alexandre e seu orientado, mestrando em Engenharia Civil Euzébio Bernabé Zanelato da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pelo apoio nos ensaios em argamassa.

Aos alunos e ex-alunos de graduação do curso de Engenharia Ambiental da UNESP-Sorocaba, Gabriel M. Rodela, Gabriel Ruivo, Marcel Gobbi e Bruno Oliveira Garcia, pela ajuda durante os ensaios.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para que este sonho se realizasse,
meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O Brasil está entre os dez países que possuem a maior produção mundial de fundidos, movimentando aproximadamente onze bilhões de dólares por ano para uma produção de mais de três milhões de toneladas/ano. Com esta alta produtividade, a indústria de fundição gera um grande volume de resíduos, dentre eles, destacam-se os finos de areia oriundos dos sistemas de areia captados durante os processos de moldagem e desmoldagem. Este resíduo é gerado em considerável quantidade e por isso seu descarte é um dos motivos da diminuição do espaço disponível em aterros, acarretando um alto custo para as indústrias de fundição. Assim, faz-se necessário a obtenção de técnicas para reaproveitamento deste resíduo, sendo uma das alternativas a sua utilização em matriz de cimento Portland. Esta opção além de reduzir custos com descartes em aterros, também contribui com a redução do consumo e dos custos de insumos na área da construção civil. Com o objetivo de estudar este reaproveitamento, o presente trabalho foi realizado com finos de areia coletados em dois pontos do sistema de areia de uma fundição de aço. Estes resíduos foram caracterizados por fluorescência de raios X (FRX), por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), difração de raios X (DRX) e análises da morfologia e do tamanho das partículas. Sua incorporação em argamassa de cimento foi realizada com corpos de prova em substituição à parte do agregado miúdo e corpos de prova em substituição à parte do cimento. Estes corpos de prova com diferentes percentuais de resíduos foram avaliados através de ensaios de resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massas específicas. Os resultados da caracterização do resíduo demonstraram uma predominância de óxidos de ferro, cromo, alumínio e silício, caracterizando-o como proveniente de uma areia de cromita, com propriedades hidrofílicas e de granulometria fina. Estas características influenciaram nos demais ensaios, resultando em uma argamassa mais frágil e porosa, reduzindo as resistências à compressão de forma proporcional ao aumento das porcentagens de resíduos. Apesar disso, os resultados se mostraram satisfatórios, pois os valores atendem a norma NBR 13281 – assentamento e revestimentos. Conclui-se que a incorporação destes resíduos em argamassa de cimento pode ser vantajosa por diminuir o consumo das matérias-primas: agregado miúdo e cimento; além de contribuir para a redução do descarte dos resíduos em aterros sanitários.

Palavras chave: argamassa de cimento, cimento Portland, resíduos de fundição, areias descartadas de fundição.

ABSTRACT

Brazil is among the ten countries with highest worldwide production of castings products, driving about eleven billion dollars a year, producing more than three million tons/year. With this high productivity, the foundry industry generates large amounts of waste, which stands out the fine sand originating from the sand systems, during the process of molding and demolding. This waste is begotten in considerable quantity, so their disposal is one of the reasons for the decrease in available space in landfills, resulting in a high cost for foundry industry. Thus, it is necessary to find techniques to reuse this waste, as an alternative to this, its use in Portland cement matrix. This option could reduce costs with disposal at landfills and also contributes to the reduction of consumption and input costs in the construction area. In order to study this reuse, this work was performed with fine sand had gathered at two points of sand system on a steel foundry. These waste were characterized by X-ray fluorescence (XRF), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD), and analysis of morphology and particle size. Their incorporation into cement mortar was performed with specimens to replace part of the aggregate and specimens to replace part of the cement. These specimens with different percentages of waste were evaluated by compressive strength test, water absorption, voids and densities. The results of waste's characterization showed a predominance of iron oxides, chromium, aluminum and silicon, characterizing them as a chromite sand, with hydrophilic properties and fine particle size. These characteristics influenced the other analyses, resulting in a more brittle and porous mortar, the compressive strength reduced proportionally with the increase percentages of waste. However the results were satisfactory, because these are according to the standard NBR 13281 – mortar for laying and coatings. Concluding that the incorporation of these waste in cement mortar could be advantageous, reducing the consumption of raw materials, cement and aggregate, and also it is contributing to the reduction of waste disposal in landfills.

Keywords: cement mortar, Portland cement, foundry waste, waste foundry sand.

Índice de Figuras

Figura 1 - Fluxograma do Processo de Fundição	5
Figura 2 – Etapa de vazamento e peça fundida (adaptado de CIMM, 2010).....	6
Figura 3 - Ciclo da areia em uma fundição. Adaptado de Baldam e Vieira (2013).	9
Figura 4 - Desmoldagem de uma peça fundida (BALDAM e VIEIRA, 2013).....	9
Figura 5 - Sistema de areia (IMF, 2002).	10
Figura 6 - Denominações dos concretos e os ingredientes primários de sua composição (GARCIA et al., 2012).	14
Figura 7 – Camadas do revestimento de argamassa da vedação vertical (BAÍÁ e SABBATINI, 2008).....	16
Figura 8 - Esquema do sistema de areia e pontos de coleta dos resíduos.	18
Figura 9 - Equipamento de DRX e amostra disposta no equipamento.	19
Figura 10 – Etapas para confecção dos corpos de prova	22
Figura 11 - Separação dos materiais pesados.	23
Figura 12 - Mistura das matérias-primas: preparação da pasta de cimento.	23
Figura 13 - Capeamento dos corpos de prova: a) suportes metálicos para capear; b) enxofre fundente; c) capeamento; d) corpos de prova capeados.....	25
Figura 14 – Ensaio de compressão em prensa hidráulica e dispositivo para corpos de prova de argamassa.....	26
Figura 15 - Amostras imersas em água por 72 horas.....	27
Figura 16 – Esquema da balança hidrostática para determinação da massa saturada dos corpos de prova.....	28
Figura 17 - Resultado da caracterização química através de FRX.	29
Figura 18 - Difratoograma do cimento Portland CPII-F32.	31
Figura 19 - Difratoograma do agregado miúdo.....	32
Figura 20 - Difratoogramas dos resíduos A e B.	33
Figura 21 - Curva granulométrica do agregado miúdo e limites de distribuição granulométrica conforme Norma NBR 7211 (ABNT, 2009).....	34
Figura 22 – Espectros de EDS – resíduo A.....	35
Figura 23 – Espectros de EDS – resíduo B.	35
Figura 24 – Micrografia eletrônica de varredura - resíduo A.....	36
Figura 25 – Micrografia eletrônica de varredura - resíduo B.....	37
Figura 26 - Expansibilidade dos corpos de prova com resíduo.....	39

Figura 27 - Relação: utilização de resíduos e percentuais de sobras da pasta de argamassa.	39
Figura 28 - Relação: consumo de resíduos e água.	40
Figura 29 - Resistência à compressão corpos de prova com resíduos A e B, substituição agregado miúdo.	41
Figura 30 - Resistência à compressão corpos de prova com resíduos A e B, substituição cimento.	43
Figura 31 - Relação: índice de vazios x absorção de água, substituição agregado miúdo...	44
Figura 32 - Absorção de água com resíduos A e B, substituição agregado miúdo.	45
Figura 33 - Índice de vazios com resíduos A e B, substituição agregado miúdo.	46
Figura 34 - Índice de vazios com resíduos A e B, substituição cimento.	47
Figura 35 - Absorção de água com resíduos A e B, substituição cimento.	48
Figura 36 - Índice de vazios com resíduos A e B, substituição cimento.	48

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características das principais areias de fundição. Adaptado de Senai (1987).....	7
Tabela 2 - Classificação do cimento Portland (adaptado de: ABNT, 1997; 1991a; 1991b; 1991c).....	13
Tabela 3 - Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland (adaptado de: ABCP, 2002).	14
Tabela 4 - Classificação das argamassas de acordo com critérios físico-químicos (CARASEK, 2010).	15
Tabela 5 - Classificação das argamassas de acordo com suas funções na construção (CARASEK, 2010).	15
Tabela 6 – Classificação do agregado miúdo (SILVA, 2006).....	20
Tabela 7 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo (ABNT 2009):	20
Tabela 8 - Proporção das matérias-primas utilizadas.	24
Tabela 9 - Resultado da caracterização química através de FRX.....	30
Tabela 10 - Resultados da análise granulométrica do agregado miúdo.....	33
Tabela 11 – Resultado das massas para presença de orgânicos nos Resíduos A e B.	37
Tabela 12 – Índice de Consistência – espalhamento da argamassa - Resíduos A e B.....	40
Tabela 13 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão, substituição agregado miúdo.....	42
Tabela 14 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão, substituição cimento.....	44
Tabela 15 - Massas específicas amostras secas e saturadas, substituição agregado miúdo.....	46
Tabela 16 - Massas específicas amostras secas e saturadas, substituição cimento.	49

Sumário

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivos Gerais	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 A Indústria de Fundição	4
3.2 Areia de Fundição, Sistemas de Areia e Finos de Areia	6
3.2.1 Areia de Fundição	6
3.2.2 Sistemas de Areia	8
3.2.3 Origem dos finos de areia	10
3.3 Reciclagem e Reutilização de Areias Descartadas de Fundição	11
3.4 Cimento Portland e Argamassas	12
3.4.1 Cimento Portland	12
3.4.2 Argamassas	14
4 MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1 Materiais	17
4.2 Coleta dos Finos de Areia de Fundição	17
4.3 Caracterização das Matérias-primas	18
4.3.1 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)	18
4.3.2 Difração de Raios X (DRX)	18
4.3.3 Análise Granulométrica	19
4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	21
4.3.5 Presença de Orgânicos	21
4.4 Confeção dos Corpos de Prova	22
4.5 Caracterização da Argamassa no Estado Fresco	24
4.6 Ensaios de Resistência à Compressão	25
4.7 Ensaios de Absorção de Água, Índice de Vazios e Massas Específicas	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Caracterização das Matérias-primas	29

5.1.1	Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX).....	29
5.1.2	Difração de Raios X (DRX).....	31
5.1.3	Análise Granulométrica	33
5.1.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	34
5.1.5	Presença de Orgânicos.....	37
5.2	Caracterização da Argamassa no Estado Fresco.....	38
5.3	Ensaio de Resistência à Compressão	41
5.3.1	Substituição do Agregado Miúdo	41
5.3.2	Substituição do Cimento	42
5.4	Ensaio de Absorção de Água, Índice de Vazios e Massas Específicas	44
5.4.1	Substituição do Agregado Miúdo	44
5.4.2	Substituição do Cimento	47
6	CONCLUSÕES	50
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

A atividade de fundição é um dos mais antigos processos de fabricação de peças utilizadas no mundo, permitindo a produção de peças de variados tamanhos, geometrias e complexidades, produzindo desde simples lingotes até peças complexas como blocos de motores (MORO e AURAS, 2007).

De maneira simplificada, este processo consiste no vazamento de metal líquido em um molde e a posterior extração da peça, após a solidificação desse metal líquido.

Para tanto, o método comumente usado nas indústrias de fundição é a moldagem em moldes de areia, como quartzo, cromita e zirconita (SAMPAIO et al., 2008). Assim, estima-se que mais de 80% dos fundidos são fabricados através de moldes de areia aglomerada (MARIOTTO, 2000).

Neste tipo de fundição, após a solidificação do metal líquido, os moldes de areia são destruídos na desmoldagem da peça fundida e a areia é recuperada. Contudo, durante todo o ciclo da areia, poderão ocorrer alterações em suas propriedades físico-químicas. Por exemplo, a geração de finos que não poderão ser reaproveitados no sistema, convertendo-se em resíduos. Estes resíduos serão descartados juntamente com as areias que são perdidas por fugas no sistema de areia, na moldagem e na desmoldagem (MACIEL, 2005).

Com este cenário, as fundições utilizam toneladas de areia por ano para realização do seu processo, calcula-se que para cada tonelada de metal fundido se tenha em torno de uma tonelada de areia descartada (KLINSKY, 2008).

No Brasil, estima-se que o volume de areia descartada de fundição (ADF) gira em torno de 3,34 milhões de toneladas/ano (ABIFA, 2012) e, em quase sua totalidade, estes resíduos são classificados como Classe II-A (não perigoso e não inerte) de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (SILVA, 2007).

Em virtude dos possíveis impactos ambientais decorrentes do descarte deste resíduo, do volume de areia e finos dispostos nos aterros sanitários, dos altos custos envolvidos nestas operações, ou mesmo por pressões legais e da sociedade, as fundições vem buscando desenvolver técnicas que visem o reaproveitamento das areias descartadas de fundição (ADF).

Neste sentido, algumas pesquisas apontam para o reaproveitamento das ADFs na construção de rodovias (PARTRIDGE et al., 1998); como agregado miúdo em concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) (BONET, 2002); e em misturas asfálticas densas (COUTINHO, 2004).

Outros estudos mostram resultados positivos na utilização destes resíduos (ADF a base de sílica) como substituto de parte do agregado miúdo em argamassa (ARMANGE et al., 2005); na confecção de concreto, tijolos cerâmicos e solo-cimento (BANDA NORIEGA et al., 2011; SIDDIQUE e SINGH, 2011; SINGH e SIDDIQUE, 2012; ROSSETTO et al., 2011).

Neste contexto, o trabalho em questão aborda a caracterização dos finos de areia captados no sistema de areia de uma fundição e sua utilização para confecção de argamassas de cimento, substituindo parte do agregado miúdo e parte do cimento empregado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Este estudo teve como objetivo a caracterização dos finos de areia captados por exaustão no sistema de areia de uma fundição de aço e a avaliação da sua incorporação em matriz de cimento Portland, em substituição de parte do agregado miúdo ou substituição de parte do cimento.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os finos de areia de fundição quanto às suas características: química, mineralógica e morfológica;
- Avaliar a argamassa produzida com substituição de parte do agregado miúdo ou parte do cimento Portland quanto ao seu:
 - estado fresco: através de ensaios de consistência e observação da trabalhabilidade, do consumo de água, da expansibilidade e da contratilidade e;
 - estado endurecido através dos ensaios de: resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massas específicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Indústria de Fundição

Fundição é o processo de fabricação onde um metal ou liga metálica é fundida e vazada em um molde com formato e medidas similares aos da peça a ser produzida. Este material fundido solidifica-se e é extraído do molde, originando assim, a peça (MACHADO, 2006).

Os métodos e a aplicação da fundição são muito antigos, estima-se que as primeiras peças fundidas datam de 10.000 anos a.C., tratando-se de pequenos ornamentos de cobre (BALDAM e VIEIRA, 2013). Inicialmente este processo era bem rudimentar e consistia na utilização de metais e ligas com baixo ponto de fusão, como o cobre e o bronze, fundidos em fornos de pedra e cerâmica (MORO e AURAS, 2007).

Com o desenvolvimento da tecnologia, esses métodos também foram sendo aprimorados, variando em termos de utilização de insumos, técnicas de moldagem, softwares de modelagem, entre outros recursos.

Segundo Chiaverini (1986), o processo de fundição pode ser classificado de acordo com os métodos de vazamento e de molde utilizado:

- Moldagem em molde de areia, vazamento por gravidade (areia verde, areia seca, areia-cimento, areia de macho);
- Moldagem em molde metálico, vazamento por gravidade ou sob pressão;
- Moldagem pelo processo de CO₂;
- Fundição por centrifugação;
- Fundição de precisão – em casca e de cera perdida

Destes processos, o mais tradicionalmente utilizado é a moldagem em areia com vazamento por gravidade. Existem registros da utilização de areia na fabricação de moldes para o processo de fundição desde 1500, sendo que, no final do século XIX começaram a ser utilizados aglomerados de argila, bentonita e resinas químicas (MEDEIROS, 2009).

A principal vantagem do processo de fundição é fornecer componentes com formas e dimensões o mais próximo possível das requeridas, diminuindo assim o tempo em processos posteriores, como por exemplo, na usinagem. Consequentemente isso diminui os custos de fabricação, mantendo as características técnicas necessárias às peças.

A Figura 1 mostra de forma resumida o fluxo de um processo de fundição de aço.

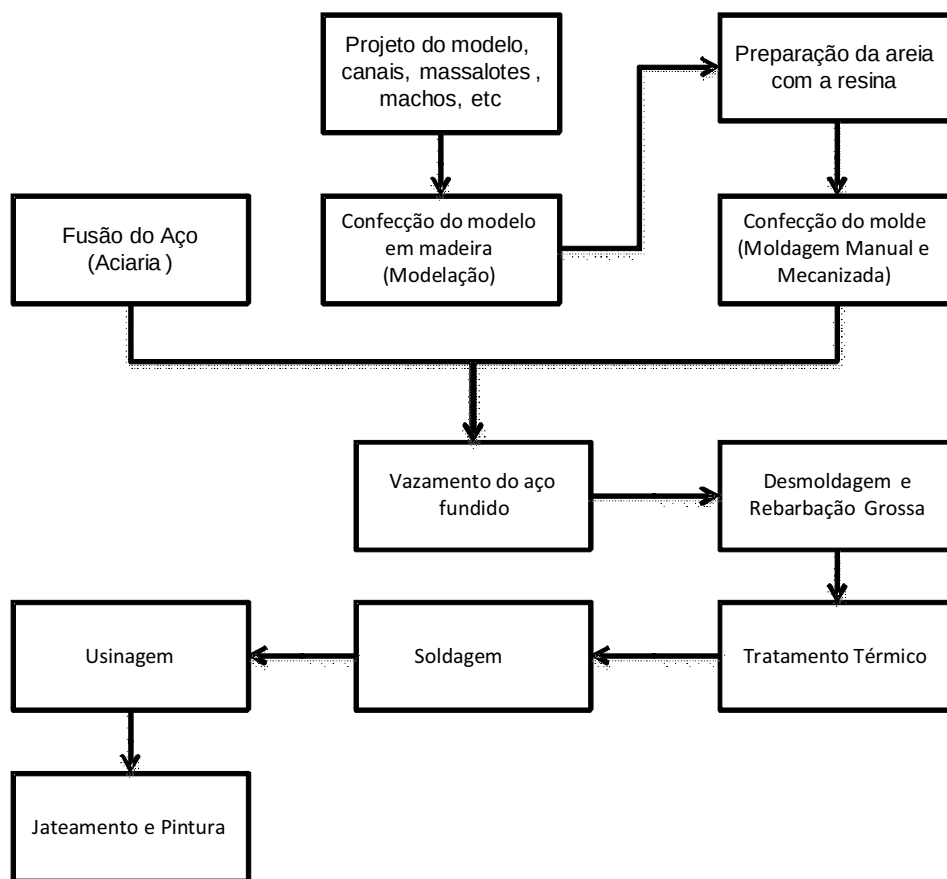


Figura 1 - Fluxograma do Processo de Fundição

Segundo Lopes e Estrela (2003), a primeira etapa consiste na construção do ferramental, denominado modelo. Trata-se da reprodução geométrica e dimensional da peça desejada. De acordo com o tamanho da peça a ser fundida, o modelo pode ser dividido em duas partes (bipartido) ou mais; podendo ser confeccionado em madeira, plástico ou em metais como alumínio e ferro. Para reprodução das partes "ocas" da peça, como furos passagens, etc., são construídas as caixas de machos, feitas de forma similar aos modelos.

Para as fundições em areia, o próximo passo seria a preparação da areia, normalmente constituída por areia base, com propriedades refratárias; um aglomerante, que funcionará como ligante; e um plastificante, que permitirá, por exemplo, a moldabilidade.

Em seguida os modelos são colocados em caixas que são preenchidas com a areia de fundição, preparada anteriormente. É feita a colocação dos machos, massalotes, canais e respiros, tratando-se assim da moldagem. Após o tempo de cura da areia de fundição, o modelo é extraído, e o molde está pronto para a etapa seguinte.

A próxima fase é o vazamento do metal líquido no molde para preenchimento dos espaços vazios. O metal líquido irá solidificar-se, formando assim, a peça fundida.

A etapa posterior é a desmoldagem, onde o molde deve ser quebrado; a peça segue para as etapas de quebra de massalotes/respiros, e, conforme aplicável, soldagem, tratamento térmico, jateamento e pintura; enquanto que o molde quebrado em pedaços, passa pelo processo de recuperação da areia (LOPES e ESTRELA, 2003).

A Figura 2 ilustra um molde de areia com a etapa de vazamento e a peça pronta.

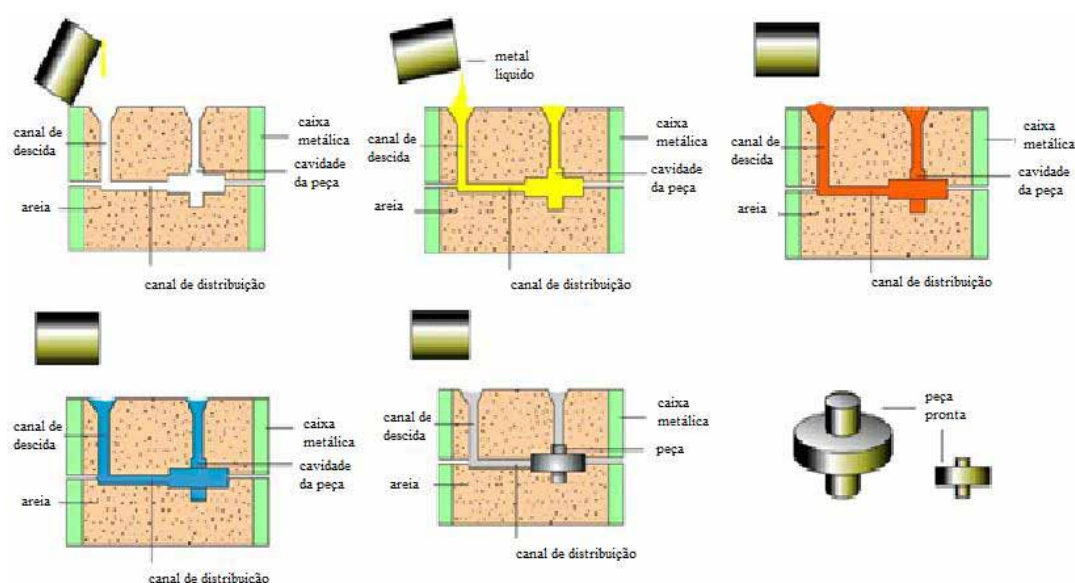


Figura 2 – Etapa de vazamento e peça fundida (adaptado de CIMM, 2010).

3.2 Areia de Fundição, Sistemas de Areia e Finos de Areia

3.2.1 Areia de Fundição

O processo de moldagem trata-se da construção do molde onde o metal líquido será vazado. Este processo influencia nas variáveis de solidificação e no acabamento superficial das peças, por isso é uma etapa fundamental nas indústrias de fundição, devendo ser rigidamente controlado (BALDAM e VIEIRA, 2013).

Os métodos mais usuais para confecção dos moldes de areia são: areia sintética ou areia verde; areia de cura à frio; *shell molding*; *cold box*; *hot box* e CO_2 (SANTOS et al., 2010).

A areia de fundição é normalmente constituída de areia-base, aglomerantes ou ligantes e aditivos ou conversores e água.

Conforme Mariotto (2000), as areias-base mais utilizadas são quartzo, zirconita, cromita e olivina. A Tabela 1 apresenta algumas das características das principais areias de fundição.

Tabela 1 - Características das principais areias de fundição. Adaptado de Senai (1987).

Características		Sílica	Cromita	Zirconita	Olivina
Composição química					
Sílica	% SiO ₂	> 99	< 3	30 a 34	40 a 43
Alumina	Al ₂ O ₃		12 a 25		
Óxido de cromo	Cr ₂ O ₃		36 a 50		
Magnésio	MgO		13 a 18		49 a 52
Óxido de zircônio	ZrO ₃			64 a 68	
Óxido férrico	Fe ₂ O ₃		15 a 25	< 1	
Características físicas					
Densidade real g/cm³		2,20 a 2,65	4,45 a 4,65	4,6 a 4,7	3,25 a 3,4
Densidade aparente g/cm³		1,7	2,7 a 2,9	3,0 a 3,1	2,1 a 2,3
Dilatação média até 1000°C %		1,5	0,9	0,4	1,1
Temperatura de fusão °C		1650 a 1750	1900 a 2200	2550	1300 a 1800

O quartzo (sílica – SiO₂) é mais comumente aplicado devido sua abundância e baixo custo, no entanto, os avanços tecnológicos neste processo passaram a exigir uma areia que permitisse um acabamento melhor às peças fundidas. Assim, desenvolveu-se a utilização de areias naturais compostas, como cromita (Cr₂O₃) e zirconita (ZrO₂) (SAMPAIO et al., 2008).

Como principais características, as areias-base devem (BALDAM e VIEIRA, 2013):

- Ser as mais puras possíveis, pois as impurezas podem baixar o ponto de fusão do molde e gerar reatividade com o metal;
- Ser livres de orgânicos para evitar o aumento do consumo de ligantes e geração de gases;
- Ser controladas quanto à forma dos grãos. Grãos arredondados consomem menos ligantes, mas tendem a ter maior arraste pelo metal líquido;
- Ser controladas quanto à granulometria. Areias mais grossas (módulo de finura de 30 a 50 AFS¹) são mais utilizadas para enchimento dos moldes, enquanto as mais finas (módulo de finura de 70 a 150 AFS) são utilizadas para faceamento (enchimento da parte que fica em contato moldes).

¹ AFS – *American Foundry Society*: unidade de medida utilizada para o módulo de finura de uma areia de fundição.

- Ser controladas quanto à densidade e ponto de fusão. Estas informações contribuem na escolha mais adequada da confecção do molde em relação ao tamanho, complexidade da peça e tipo de metal;

- Ser controladas quanto à expansibilidade, para evitar defeitos nas peças.

Em relação aos aglomerantes, eles podem ser orgânicos naturais, inorgânicos ou sintéticos. Suas funções são a cura da areia, devido sua capacidade de polimerização e conferir resistência às solicitações dinâmicas, estáticas e térmicas provocadas pelo metal fundido.

Dentre os aglomerantes orgânicos naturais, destacam-se os açúcares, o melaço de cana e óleos; já dentre os aglomerantes inorgânicos destacam-se as argilas (como a bentonita) e o cimento (KLINSKY, 2008).

Enquanto que os aglomerantes sintéticos mais usuais são o metanol, o formol, o fenol e a uréia, bem como a mistura entre eles, como, por exemplo, as resinas fenólicas produzidas através da reação entre o fenol e formol (MARIOTTO, 2000).

Os aditivos são utilizados com as resinas sintéticas para promover seu processo de cura, enquanto que água é mais comumente utilizada nos processos de areia verde para promover sua moldabilidade.

Os principais atributos que as areias de fundição devem ter são:

- Moldabilidade: é a capacidade da areia de adquirir a forma do modelo com o menor esforço possível (MARIOTTO, 1986);

- Resistência mecânica: relacionada à capacidade da areia de manter seu formato após extração do modelo e de resistir aos esforços físicos impostos pelo metal líquido, durante seu vazamento e resfriamento (SENAI, 1987);

- Permeabilidade: refere-se à capacidade da areia de permitir a passagem de gases formados na etapa de vazamento do metal líquido, em excesso produz peças com alta rugosidade (BALDAM e VIEIRA, 2013);

- Resistência térmica: mede o quanto o molde de areia poderá resistir e/ou é afetado pelo calor.

3.2.2 Sistemas de Areia

Pode-se dividir o uso da areia em uma fundição em dois ciclos distintos, sendo o primeiro relacionado à preparação da areia e o segundo relacionado à sua utilização (Figura 3).

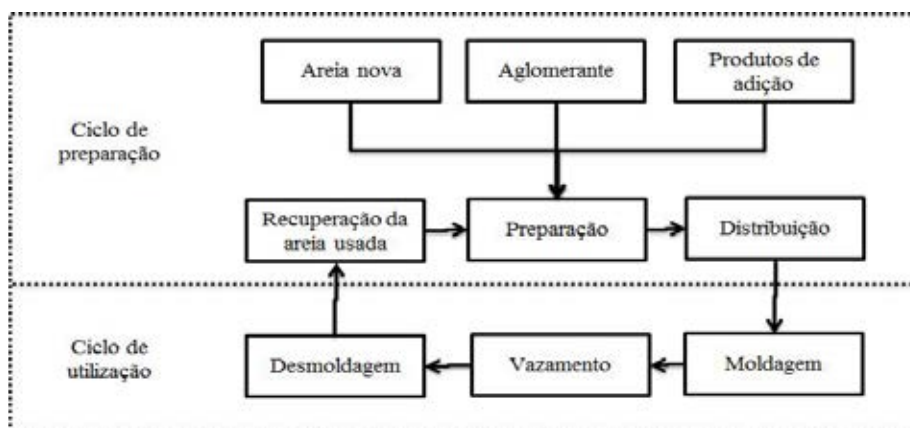


Figura 3 - Ciclo da areia em uma fundição. Adaptado de Baldam e Vieira (2013).

Na etapa de preparação são utilizadas tanto areia nova quanto areia recuperada captada após o processo de desmoldagem da peça fundida. Para esta etapa poderão ser utilizados diversos tipos de equipamentos para mistura dos constituintes da areia de fundição e para o peneiramento e separação dos contaminantes, com o intuito de garantir as propriedades discutidas anteriormente.

Os mecanismos de transporte destas areias podem ser feito por tubulação à vácuo, esteiras, entre outros.

Após a solidificação e o resfriamento da peça ocorre a sua desmoldagem, ou seja, a separação da peça do molde de areia (Figura 4).

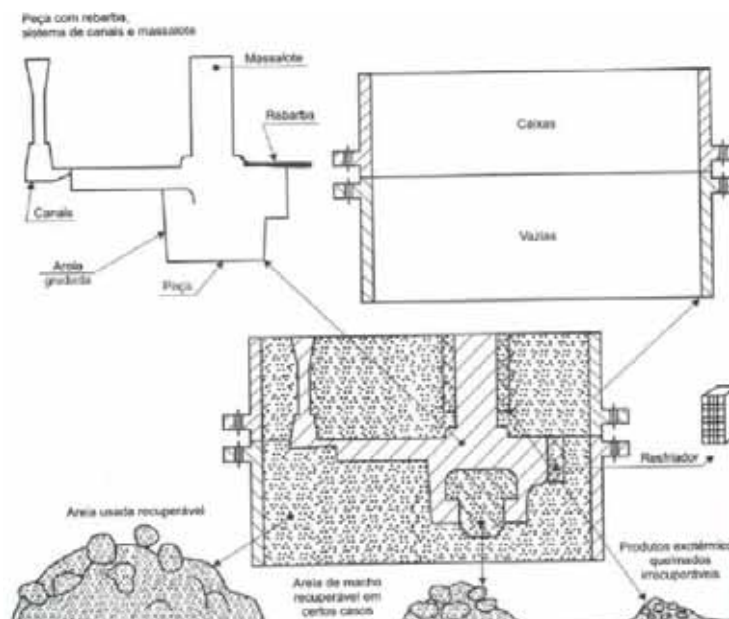


Figura 4 - Desmoldagem de uma peça fundida (BALDAM e VIEIRA, 2013).

Para esta operação existem diversas técnicas, destacando-se as desmoldagens por (BALDAM e VIEIRA, 2013):

- Choque: quebra do molde através de picareta, martelo, alavanca ou marteletes pneumáticos; para peças pequenas podem-se elevar as caixas deixando-as cair várias vezes no chão;
- Vibração: os moldes são quebrados através do auxílio de vibradores pneumáticos que podem ser presos à guias ou diretamente nas caixas ou através de mesas vibratórias;
- Extrusão: trata-se da utilização de um platô com punção que irá movimentar-se verticalmente na parte superior do molde, promovendo sua quebra.

Após a desmoldagem é feita a recuperação da areia, para tanto, existem diversos sistemas como, por exemplo, os sistemas de recuperação mecânica, apresentado na Figura 5.

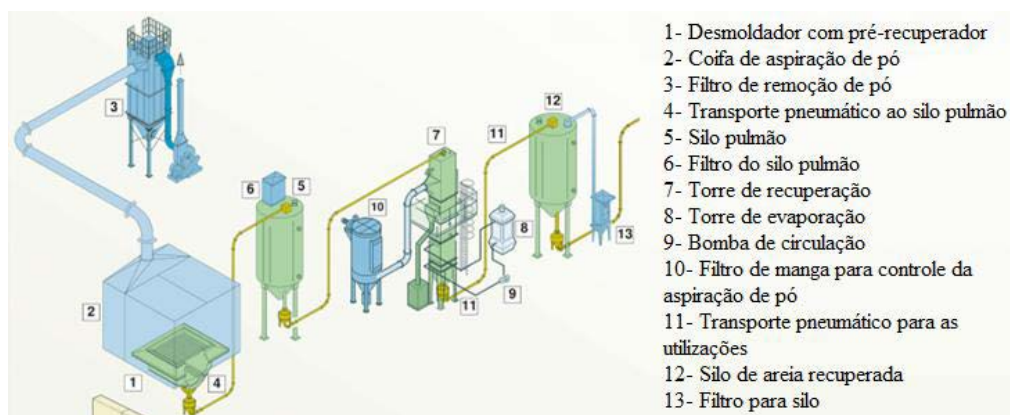


Figura 5 - Sistema de areia (IMF, 2002).

3.2.3 Origem dos finos de areia

As areias utilizadas na moldagem sofrem alterações em seus grãos em decorrência das exposições mecânicas, térmicas e químicas que ocorrem nos processos de moldagem, vazamento, desmoldagem e também em seu manuseio.

O contato da areia com o metal líquido em alta temperatura gera um stress térmico, causando a fratura dos grãos de areia surgindo assim, um material muito fino e indesejado para a confecção dos moldes; o mesmo pode ocorrer por abrasão, devido o stress mecânico, ou seja, o contato entre os próprios grãos de areia causa seu desgaste (RUNDMAN, 2000).

A este material costuma-se denominar *finos*, ou seja, partículas de dimensões pequenas demais para que se comportem como partículas individuais, ficando aderidas aos grãos maiores quando a areia é umedecida e/ou aglomerada. Estes finos aderidos aumentam a superfície específica da areia aumentando o consumo de água e aglomerantes (MARIOTTO, 2005).

Os finos de areia são captados pelos sistemas de exaustão, segregados e descartados por não serem mais utilizáveis. Sua composição pode variar de acordo com o metal fundido, o tipo de areia, de aglomerantes e de aditivos empregados e, também, conforme as interações entre estes elementos.

No Brasil estima-se que são descartadas pelas fundições cerca de dois milhões de toneladas/ano de areia contaminada com resinas fenólicas (SCHEUNEMANN, 2005), destes resíduos, os finos de areia podem variar entre 3% e 8% do total (D'ELBOUX, 2000), sendo que a disposição das areias de fundição pode ocasionar a contaminação do solo e do lençol freático em virtude da lixiviação (MACIEL, 2005).

3.3 Reciclagem e Reutilização de Areias Descartadas de Fundição

Conforme Klinsky (2008), a reutilização do resíduo de areia pode ocorrer na própria indústria de fundição, na chamada “Reciclagem Primária”, ou externamente, com a “Reciclagem Secundária”, onde o resíduo serve como matéria prima para outra atividade que não seja a de fundição.

De acordo com o autor, a areia de fundição residual pode ser utilizada, na reciclagem secundária, principalmente na área de construção civil, como por exemplo: na fabricação de concreto, tijolos, tubos, como substituto de agregado miúdo no concreto asfáltico e na construção de rodovias.

Armenge et al (2005), estudaram a utilização de areia de bentonita, à base de sílica, em substituição ao agregado em argamassa, obtendo resultados favoráveis para a areia originada na moldagem.

Banda Noriega et al (2011), também indicaram bons resultados utilizando areia de resina fenólica, à base de sílica, para confecção de concreto e em tijolos com baixa dosagem de cimento.

Enquanto que Siddique e Singh (2011) demonstraram que a utilização de areia de fundição na confecção de concreto teve um melhor desempenho no que se refere à

diminuição da absorção de água e consequentemente maior resistência do material, sendo que este aumentou com o tempo de cura.

Em Carnin et al (2010), as areias descartadas de fundição foram utilizadas para confecção de pavimento intertravado. Este estudo demonstrou que as peças fabricadas com o resíduo atenderam a resistência mecânica, a durabilidade e os critérios de toxicidade da Fundação de Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA).

Nota-se que a maioria dos trabalhos voltados para resíduos de fundição estão direcionados para o reaproveitamento das areias de fundição, independentemente da sua origem: finos gerados no sistema de areia ou areias descartadas após sua reutilização. Nestes estudos, são levados em consideração, entre outros fatores, a composição química do resíduo utilizado e sua porcentagem de incorporação.

O aproveitamento dos resíduos de areia de fundição, como matéria-prima na produção de novos materiais para construção civil, além de diminuir o consumo de recursos naturais, também destina de forma mais adequada os resíduos gerados pelas indústrias de fundição. Sendo assim, esta é uma alternativa a ser pensada e avaliada para este tipo de resíduo.

3.4 Cimento Portland e Argamassas

3.4.1 Cimento Portland

O cimento é obtido pela moagem e calcinação de pedras de minerais calcários e argilosos, desta forma, ele é constituído basicamente de silicatos e aluminatos de cálcio (GARCIA et al., 2012).

O cimento Portland foi assim nomeado por causa da sua semelhança com a coloração das rochas calcárias da ilha britânica de Portland (BATTAGIN, 2012). Devido suas propriedades aglomerantes, ele endurece após hidratação com água, permanecendo estável.

Sua descoberta ocorreu no século XIX pelo inglês Joseph Aspdin, quando este queimou uma mistura de pedras calcárias e argila; transformou-as em um pó fino que foi misturado à água, formando uma pasta moldável que após secagem tornava-se muito dura (GARCIA et al., 2012).

O calcário é obtido através da extração, britagem e moagem de rochas calcárias, que são adequadamente misturadas à argila moída. Este material é aquecido à 1450°C transformando-se no clínquer, um novo material.

A este material são adicionadas outras matérias-primas, chamadas de adições, que irão variar os tipos de cimento existentes. As adições podem ser (ABCP, 2002):

- Gesso - tem como função principal controlar o tempo de pega ou endurecimento do clínquer, retardando este processo;
- Escórias de alto-forno - são resíduos obtidos durante a produção do ferro-gusa, nas siderúrgicas. Permite manter as propriedades do cimento comum, aumentando sua durabilidade e resistência final;
- Materiais pozolânicos - obtido, entre outras formas, de rochas vulcânicas e matéria orgânica fossilizada. Aumenta a impermeabilidade dos concretos e argamassas produzidos com este tipo de cimento;
- Materiais carbonáticos - obtido através da moagem de rochas que possuam carbonato de cálcio em sua composição. Aumentam a trabalhabilidade dos concretos e argamassas.

Assim, o cimento Portland é classificado conforme os materiais de adição e sua resistência à compressão (Tabela 2).

Tabela 2 - Classificação do cimento Portland (adaptado de: ABNT, 1997; 1991a; 1991b; 1991c).

Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Classe de resistência	Norma Brasileira (ABNT)
		Clínquer + gesso	Escória de alto forno (E)	Material pozolânico (Z)	Material carbonático (F)		
Comum	CP I	100	-	0	-	25 32 40	NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10		NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10		
	CP II-F	94-90		-	6-10		
Alto-forno	CP III	65-25	35-70		0-5		NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	25-32	NBR 5736

O cimento tem uma aplicação bem variada na construção civil de acordo com os componentes que são adicionados em sua mistura. A Figura 6 demonstra alguns materiais obtidos através da mistura de diversos ingredientes, enquanto que a Tabela 3 resume algumas das aplicações destes materiais.

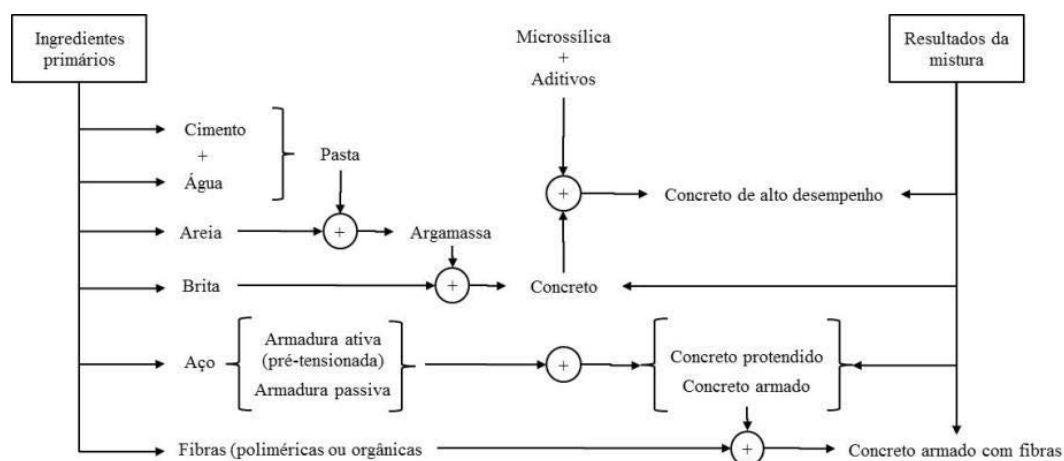


Figura 6 - Denominações dos concretos e os ingredientes primários de sua composição (GARCIA et al., 2012).

Tabela 3 - Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland (adaptado de: ABCP, 2002).

Aplicação	Tipos de cimento Portland
Argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e blocos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Argamassa de assentamento de azulejos e ladrilhos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F) e Pozolânico (CP IV)
Argamassa de rejuntamento de azulejos e ladrilhos	Branco (CPB)
Argamassas e concretos para meios agressivos (água do mar e de esgotos)	Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Resistente a Sulfatos

3.4.2 Argamassas

As argamassas são constituídas através da mistura homogênea do cimento, areia e água, formando um material aderente. (CARASEK, 2010).

Neste caso o cimento funciona como aglomerante, ou seja, tem a função de fixar ou aglomerar outros materiais. Também é possível obter outros tipos de argamassa alterando os aglomerantes e aditivos, de acordo com as características desejadas para cada argamassa (HAGEMANN, 2011).

Existem diversas formas de classificação das argamassas, dentre elas estão as classificações que levam em consideração os critérios físico-químicos e as classificações segundo sua aplicação na construção civil. As Tabelas 4 e 5 apresentam essas classificações com os tipos de argamassas de acordo com os critérios físico-químicos e com suas funções, respectivamente.

Tabela 4 - Classificação das argamassas de acordo com critérios físico-químicos (CARASEK, 2010).

Critério de Classificação	Tipos de Argamassas
Quanto à natureza do aglomerante	Argamassa aérea e argamassa hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerante	Argamassa de cal, argamassa de cimento, argamassa de cimento e cal, argamassa de gesso e argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerantes	Argamassa simples e argamassa mista
Quanto à consistência da argamassa	Argamassa seca, argamassa plástica e argamassa fluída
Quanto à plasticidade da argamassa	Argamassa pobre ou magra, argamassa média ou cheia e argamassa rica ou gorda
Quanto à densidade de massa da argamassa	Argamassa leve, argamassa normal e argamassa pesada
Quanto à forma de preparo e fornecimento	Argamassa preparada em obra, mistura semipronta para argamassa, argamassa industrializada e argamassa dosada em central

Tabela 5 - Classificação das argamassas de acordo com suas funções na construção (CARASEK, 2010).

Função	Tipos de Argamassas
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação de alvenaria)
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de fixação (alvenaria de vedação), argamassa de chapisco, argamassa de emboço, argamassa de reboco, argamassa de camada única e argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimentos de pisos	Argamassa de contrapiso e argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes e pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas (colante) e argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

3.4.2.1 Argamassas de Cimento

Para este trabalho foi utilizada a argamassa de cimento sendo esta constituída basicamente de cimento Portland, agregado miúdo e água, obtendo-se uma pasta de pouca trabalhabilidade e baixa retenção de água, mas com elevada resistência mecânica quando endurecida (SILVA, 2006).

A aplicação deste material é variável de acordo com a dosagem areia:cimento, podendo ser aplicada como chapisco em paredes de alvenaria e barra lisa de cimento, também chamado de cimento queimado (ZULIAN et al, 2002).

Além destas aplicações, as argamassas de cimento podem ser utilizadas em revestimentos onde a impermeabilidade é necessária, como em reservatórios de água e outras aplicações hidráulicas (FIORITO, 1994).

Nas aplicações de assentamento e revestimento de paredes e tetos, onde se inclui o chapisco, os requisitos da argamassa são definidos pela norma NBR 13281, que estabelece uma variação na resistência à compressão de 28 dias entre 0,1 MPa a 8,0 MPa (ABNT, 2001).

A Figura 7 ilustra dois tipos de revestimento de paredes: tipo emboço e reboco e tipo massa única, que são aplicados sobre a alvenaria, previamente preparada com o chapisco.

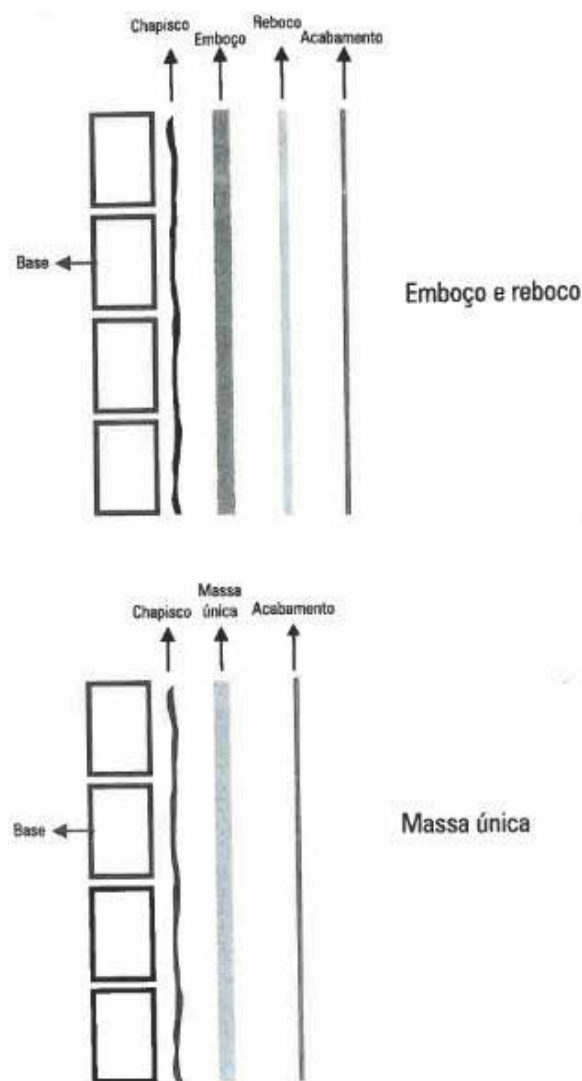


Figura 7 – Camadas do revestimento de argamassa da vedação vertical (BAÍA e SABBATINI, 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa: descrever os ensaios realizados para caracterizar os finos de areia captados em uma fundição de peças em aço, descrever como os corpos de prova de argamassa de cimento foram confeccionados e analisar o comportamento da argamassa de cimento produzida com a incorporação dos resíduos.

4.1 Materiais

As argamassas estudadas neste trabalho foram obtidas substituindo uma fração dos agregados miúdos e também substituindo uma fração do cimento Portland pelos finos de areia. Foram utilizadas como matérias-primas destas argamassas:

- Cimento Portland: cimento comercial denominado como Portland Composto com Fíler, de sigla CPII-F e classe de resistência de 32 MPa. Este cimento tem em seus componentes teores em massa de 90-94% de clínquer e sulfatos de cálcio e de 6-10% de material carbonático (rochas trituradas que contém carbonato de cálcio) (ABNT, 1997);
- Agregado miúdo: areia comum – material granular, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm (ABNT, 2009);
- Resíduos: finos de areia captados por exaustão no sistema de areia de uma fundição de aço;
- Água potável.

4.2 Coleta dos Finos de Areia de Fundição

Para desenvolvimento do trabalho foram coletadas amostras de dois tipos de finos de areia de fundição, segundo os pontos de descarte/geração destes resíduos. A Figura 8 apresenta o sistema de areia e os pontos de coleta destes resíduos (pontos A e B destacados). O resíduo “A” são finos que se originam após a desmoldagem das peças fundidas, durante a recuperação mecânica e resfriamento por gravidade da areia de fundição. Enquanto que o resíduo “B” é captado no silo da máquina da moldagem mecanizada, mas que já passou por todo o processo de recuperação do sistema de areia.

Após coleta, estas amostras foram identificadas e armazenadas separadamente em local livre de intempéries.



Figura 8 - Esquema do sistema de areia e pontos de coleta dos resíduos.

4.3 Caracterização das Matérias-primas

4.3.1 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

Os resíduos A e B foram caracterizados quanto às suas composições químicas, por fluorescência de raios X (FRX). Foi feita análise de forma a identificar elementos químicos de flúor a urânio, em espectrômetro Axios Advanced, da marca PANalytical do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Esta técnica permite detectar o percentual dos óxidos: Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, Cl, K₂O, CaO, TiO₂, V₂O₅, Cr₂O₃, MnO, Fe₂O₃, NiO, CuO, ZnO, Ga₂O₃, SrO, ZrO₂ e PbO presentes nas amostras.

4.3.2 Difração de Raios X (DRX)

Os resíduos de areia de fundição, o cimento e a areia comum (agregado miúdo) utilizados na pasta de argamassa foram submetidos à técnica de difração por raios X (DRX) com o objetivo de identificar as fases minerais presentes nestas amostras, permitindo o estudo das suas estruturas cristalinas.

Para este ensaio foi separada uma quantidade de cada material e colocado no porta-amostras, prensando-os levemente.

Em seguida cada amostra foi disposta no aparelho de DRX modelo X'pert Pro da marca PANalytical (Figura 9) do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP Sorocaba, com as seguintes configurações: grau de varredura de 20° à 90° ; passo de 0,1 grau à cada 6 segundos; 40 KV e 40 mA; radiação k-alfa do cobre ($1,540598 \text{ \AA}$).

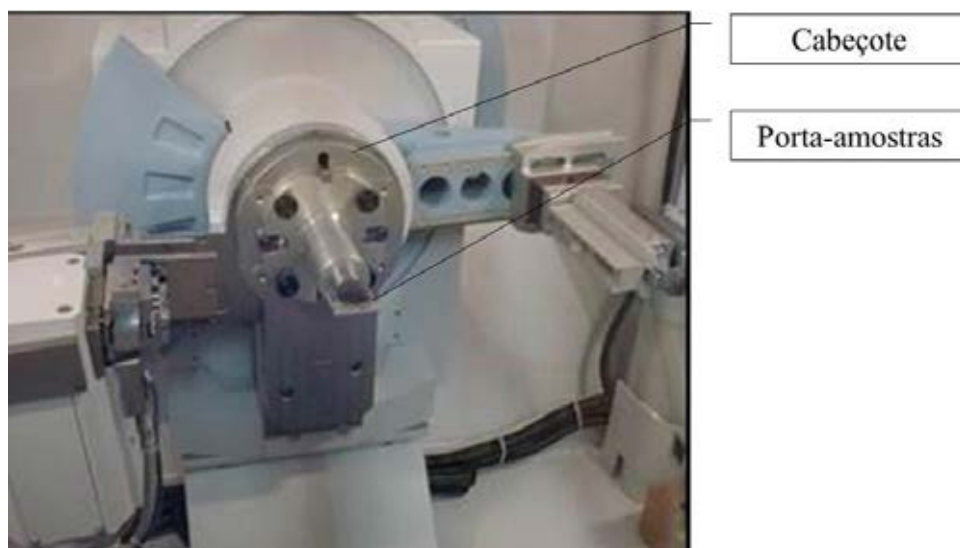


Figura 9 - Equipamento de DRX e amostra disposta no equipamento.

4.3.3 Análise Granulométrica

Para determinação da granulometria do agregado miúdo, utilizou-se um jogo de peneiras de 1,18 mm, 600 μm , 300 μm , 150 μm e 75 μm .

Foram extraídas duas amostras do agregado miúdo, que foram secas em estufa à $100^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C}$ e esfriadas à temperatura ambiente. O ensaio foi realizado com a primeira amostra A_1 , e em seguida repetido com a segunda amostra A_2 , conforme norma NBR NM 27:2001 e NBR NM 248:2001.

As peneiras foram dispostas umas sobre as outras, em ordem crescente da base para o topo, sob um agitador de peneiras da marca Solotest, operando a uma rotação de 5 rpm, durante intervalo de 10 minutos.

Após este período, os materiais retidos em cada peneira foram pesados calculando-se (ABNT, 2003 e ABNT, 2009):

- Porcentagem retida, em massa;
- Porcentagem média, retida e acumulada, em cada peneira;

- Módulo de finura (Mf): soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, dividido por 100;
- Dimensão máxima característica (DMC): abertura nominal (em mm) da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Através do módulo de finura foi possível classificar o agregado miúdo conforme Tabela 6:

Tabela 6 – Classificação do agregado miúdo (SILVA, 2006).

Classificação	Módulo de Finura (Mf)
Grossa	Mf > 3,0
Média	2,0 < Mf < 3,0
Fina	Mf < 2,0

Com as porcentagens em massa, retidas acumuladas, de cada peneira foi possível avaliar a distribuição granulométrica e comparar com os limites estabelecidos na Norma NBR 7211, conforme Tabela 7:

Tabela 7 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo (ABNT 2009):

Peneira	Porcentagem em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

Para as análises da morfologia e a observação do tamanho das partículas dos resíduos A e B utilizou-se o MEV, uma vez que o método anterior (do agregado miúdo) e o peneiramento manual não se mostraram eficazes para realizar a análise granulométrica, pois estes materiais são muito finos e se compactam facilmente.

Para tanto, foi utilizado um equipamento de microscopia eletrônica de varredura da marca Jeol (JSM6010LA), do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP Sorocaba, sendo que a energia do feixe de elétrons e a ampliação são dadas na parte inferior de cada micrografia.

Adicionalmente, com o mesmo aparelho, foram feitas análises químicas através da técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), com a distância entre o detector e a amostra de 11 mm e a energia do feixe de elétrons de 10 keV.

4.3.5 Presença de Orgânicos

Com o objetivo de avaliar a quantidade de orgânicos presentes nos resíduos A e B, foi realizado ensaio por diferença de massa; comparando-se massa inicial com massa final, após o aquecimento de amostras para remoção da parte orgânica. Este ensaio foi realizado adaptando-se a norma ASTM D 3171 (2009).

Para este ensaio foram utilizados três cadinhos para cada resíduo, um forno-mufla da marca Quimis modelo Q-318-M24, uma balança analítica Quimis modelo Q-500L210C e um dessecador.

Os cadinhos foram lavados e secados no forno-mufla na faixa de temperatura entre 500°C a 600°C durante 20 minutos, após serem resfriados no dessecador os cadinhos foram pesados (M_c).

Foram colocadas pequenas quantidades (de 1 a 2 g) de amostras dos resíduos em cada cadinho (M_a) e estes foram levados ao forno-mufla pré-aquecido à 500°C; em seguida, aumentou-se a temperatura para 565°C mantendo-se os cadinhos com as amostras por duas horas e meia. Após este período, os cadinhos foram colocados em dessecador por 20 minutos para resfriamento e posterior pesagem (M_1).

Este processo foi repetido duas vezes, com alteração apenas no tempo de residência dos cadinhos no forno-mufla de 2,5h para 1 hora na primeira repetição (pesagem da M_2) e de 40 minutos na segunda repetição (pesagem M_3), totalizando 250 minutos de forno.

A porcentagem dos orgânicos em cada amostra foi obtida através da Equação 1:

$$\% \text{ Orgânicos} = [Ma - ((Mc + Ma) - M_3) / Ma] \cdot 100 \quad (\text{Equação 1})$$

4.4 Confeção dos Corpos de Prova

Para confecção dos corpos de prova foram preparadas composições mássicas em termos de cimento 1:3. Estes foram ensaiados em seu estado endurecido para determinar a resistência à compressão axial, a absorção de água e as massas específicas.

Todos os corpos de prova foram confeccionados segundo indicações da norma NBR 7215 (ABNT, 1996), utilizando-se corpos de prova cilíndricos com as dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura através de moldes de PVC.

Foram moldados um total de 180 corpos de prova, sendo metade destes com adição dos resíduos A e B em substituição ao agregado miúdo nas porcentagens de 0%, 10%, 20%, 30% e 40%; e a outra metade em substituição do cimento Portland, nas mesmas proporções.

A produção dos corpos de prova seguiu as seguintes etapas (Figura 10):



Figura 10 – Etapas para confecção dos corpos de prova

- Secagem da areia comum: secada à 50°C em uma estufa Quimis® por 3 dias antes da sua utilização.
- Preparação dos moldes: foi aplicado óleo mineral com auxílio de pincel, a fim de facilitar a desmoldagem dos corpos de prova;
- Separação e pesagem das matérias-primas: para a pesagem dos materiais abaixo de 400g, foi utilizada uma balança semi-analítica Mabs 1000 da Marconi® (resolução: máx. 1000g e mín 0,5g; erro de 0,1g), enquanto que, para materiais acima de 400g, foi utilizada uma balança Micheletti (resolução: máx. 100kg e mín 0,4kg; erro de 0,2g). A Figura 11 mostra a separação dos materiais já pesados;



Figura 11 - Separação dos materiais pesados.

▪ Preparação da pasta de argamassa: os materiais sólidos foram misturados com o auxílio de uma colher de pedreiro e em seguida acrescentou-se a água, misturando com uma batedeira de argamassa, conforme Figura 12;



Figura 12 - Mistura das matérias-primas: preparação da pasta de cimento.

▪ Moldagem dos corpos de prova: os moldes foram cheios com a pasta de argamassa em quatro camadas de 30 golpes de soquete para cada camada;

A Tabela 8 mostra a proporção dos componentes de cada lote de corpo de prova em massa.

Tabela 8 - Proporção das matérias-primas utilizadas.

Origem do resíduo	Tipo de substituição	% ADF	Areia (Kg)	Cimento (Kg)	Água (Kg)	ADF (Kg)
A	Areia	0%	2,90	0,97	0,80	0,00
		10%	2,61	0,97	0,78	0,29
		20%	2,32	0,97	0,82	0,58
		30%	2,03	0,97	0,96	0,87
		40%	1,74	0,97	0,98	1,16
	Cimento	0%	2,90	0,97	0,82	0,00
		10%	2,90	0,87	0,92	0,10
		20%	2,90	0,77	0,91	0,19
		30%	2,90	0,68	0,87	0,29
		40%	2,90	0,58	0,92	0,39
B	Areia	0%	2,90	0,97	0,81	0,00
		10%	2,61	0,97	0,86	0,29
		20%	2,32	0,97	0,92	0,58
		30%	2,03	0,97	0,99	0,87
		40%	1,74	0,97	1,06	1,16
	Cimento	0%	2,90	0,97	0,82	0,00
		10%	2,90	0,87	0,88	0,10
		20%	2,90	0,77	0,80	0,19
		30%	2,90	0,68	0,82	0,29
		40%	2,90	0,58	0,84	0,39

Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e cada lote foi mantido em 7, 14 ou 28 dias em água saturada com cal para o tempo de cura.

4.5 Caracterização da Argamassa no Estado Fresco

As características da massa fresca (mistura dos materiais sólidos com a água) foram analisadas quanto à sua:

- Trabalhabilidade, através de análise visual, durante a preparação da pasta de argamassa e moldagem dos corpos de prova;
- Expansibilidade e contratilidade ou retração, avaliação feita com o auxílio de paquímetro, medindo o quanto os corpos de prova aumentavam ou diminuam em sua altura durante as primeiras seis horas do processo de cura e do percentual de sobras de pasta de argamassa, considerando que a massa dos materiais sólidos é a mesma em todos os corpos de prova;

- Consumo de água, através da relação entre consumo de materiais sólidos versus consumo de água;
- Índice de Consistência, avaliação da capacidade da argamassa de deformar-se sob a ação de cargas. Feito no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense, através da norma NBR 13276 (ABNT, 2005), utilizando-se uma mesa para índice de consistência e um molde tronco cônico, medindo-se o espalhamento da argamassa.

4.6 Ensaios de Resistência à Compressão

Antes dos ensaios de compressão, os corpos de prova foram medidos em seu diâmetro e comprimento, com o auxílio de um paquímetro Mitutoyo de 150 mm resolução de $\pm 0,02\text{mm}$.

A preparação do ensaio foi feita capeando-se os corpos de prova em enxofre fundido, a fim de garantir sua planicidade e perpendicularidade, conforme mostra a Figura 13. (O capeamento é o processo pelo qual se adiciona uma camada de material nas extremidades do corpo de prova para diminuir os defeitos de planicidade e perpendicularidade).



Figura 13 - Capeamento dos corpos de prova: a) suportes metálicos para capear; b) enxofre fundente; c) capeamento; d) corpos de prova capeados.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 1996), em uma prensa hidráulica EMIC® do laboratório da empresa Supermix Concreto S/A, em Sorocaba, SP (Figura 14).



Figura 14 – Ensaio de compressão em prensa hidráulica e dispositivo para corpos de prova de argamassa.

Este equipamento possui a leitura em tonelada-força (tf), sendo assim, para cálculo da resistência à compressão e transformação da medida em megapascal (MPa), foi utilizada a Equação 2:

$$f_{ck} = ((F \times 1000) / A) / 10,1972 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

f_{ck} – Resistência à compressão (MPa)

F – Força (tf)

A – Área do topo do corpo de prova (cm²)

4.7 Ensaios de Absorção de Água, Índice de Vazios e Massas Específicas

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massas específicas, foram realizados de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Para estes ensaios

utilizaram-se os equipamentos do laboratório do grupo Natel da UNESP Sorocaba, sendo que os resultados foram obtidos através da média das três amostras de cada porcentagem de resíduo/tempo de cura.

Estas amostras foram secas à 105°C durante 72 horas, em estufa Nova Ética®, após este período, foram retiradas e pesadas na balança semi-analítica Micheletti®, sendo obtidos os resultados de massa da amostra seca em estufa (M_s).

Em seguida, as amostras foram mantidas imersas em água (Figura 15) por mais 72 horas e, após esse período, foram retiradas, sendo o excesso de água secado com papel absorvente. Realizou-se então nova pesagem das amostras, obtendo-se os resultados de massa amostra saturada (M_{sat}).



Figura 15 - Amostras imersas em água por 72 horas.

Para validação deste resultado, os corpos de prova foram colocados imersos em água por mais 24 horas, repetindo-se o processo anterior, para verificar se os resultados entre as duas medidas não diferiam em mais de 0,5% da menor massa.

Com os valores de massa da amostra seca e massa da amostra saturada foi possível calcular a absorção de água, através da Equação 3:

$$\text{Absorção de água} = [(M_{sat} - M_s)/M_s].100 \quad (\text{Equação 3})$$

Para determinar o índice de vazios e as massas específicas da amostra seca e saturada, foi necessário obter a massa da amostra saturada, imersa em água (M_i). Esta medida foi realizada com o auxílio de uma balança hidrostática, conforme Figura 16.



Figura 16 – Esquema da balança hidrostática para determinação da massa saturada dos corpos de prova.

Os resultados das forças (N) medidas pelo dinamômetro foram transformados em massa através da Equação 4.

$$M_i = (N/9,8).1000 \quad (\text{Equação 4})$$

As Equações 5, 6 e 7, mostram como foram calculados os índices de vazios, a massa específica da amostra seca e a massa específica da amostra saturada, respectivamente.

$$\text{Índice de vazios} = [(M_{sat} - M_s)/(M_{sat} - M_i)].100 \quad (\text{Equação 5})$$

$$\text{Massa específica da amostra seca} = M_s/(M_{sat} - M_i) \quad (\text{Equação 6})$$

$$\text{Massa específica da amostra saturada} = M_{sat}/(M_{sat} - M_i) \quad (\text{Equação 7})$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das Matérias-primas

5.1.1 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

Os resultados da caracterização química dos resíduos A e B, realizados através da espectrometria por fluorescência de raios X estão apresentados na Figura 17 e Tabela 9.

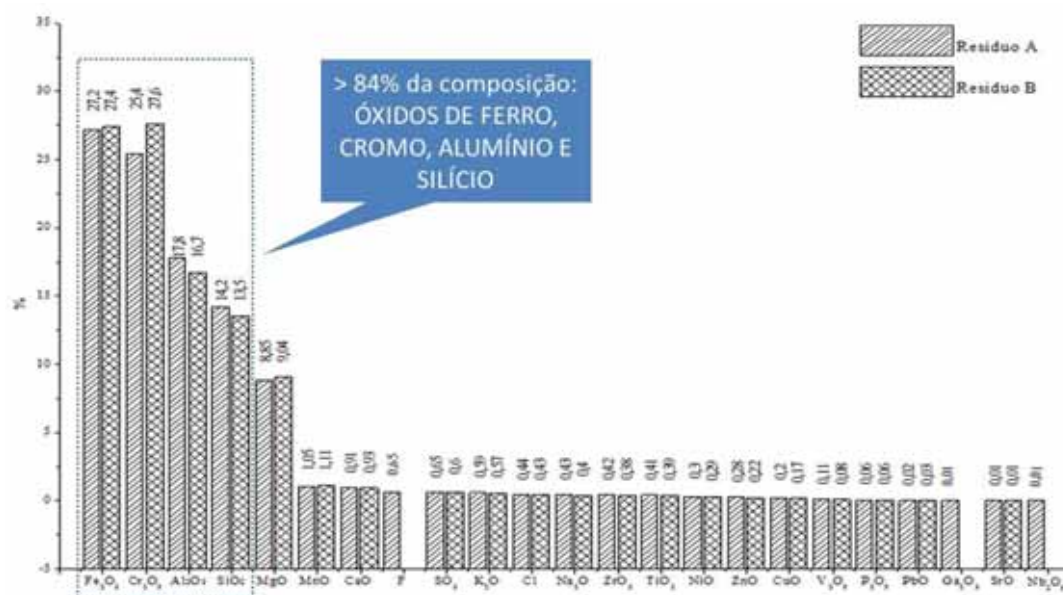


Figura 17 - Resultado da caracterização química através de FRX.

Tabela 9 - Resultado da caracterização química através de FRX.

Amostra	Resíduo A (%)	Resíduo B (%)	Amostra	Resíduo A (%)	Resíduo B (%)
Fe₂O₃	27,20	27,40	ZrO₂	0,42	0,38
Cr₂O₃	25,40	27,60	TiO₂	0,41	0,39
Al₂O₃	17,80	16,70	NiO	0,30	0,29
SiO₂	14,20	13,50	ZnO	0,28	0,22
MgO	8,85	9,04	CuO	0,20	0,17
MnO	1,05	1,11	V₂O₅	0,11	0,08
CaO	0,91	0,93	P₂O₅	0,06	0,06
F	0,65	Nd	PbO	0,02	0,03
SO₃	0,65	0,60	Ga₂O₃	0,01	Nd
K₂O	0,59	0,57	SrO	0,01	0,01
Cl	0,44	0,43	Nb₂O₅	0,01	Nd
Na₂O	0,43	0,40			

Analisando os dados pode-se verificar que existe a predominância dos óxidos de ferro, cromo, alumínio e silício, correspondendo a mais de 84% da composição dos dois resíduos.

Comparando estes resultados com as areias novas, geralmente utilizadas para fundição, nota-se a presença destes mesmos elementos nas areias de cromita, principalmente devido ao alto teor de óxido de cromo em relação ao óxido de silício e da presença superior a 15% do óxido de ferro (SAMPAIO et al, 2008; LIMA, 2009; SENAI, 1987).

Comparando-se ainda os valores de óxido de cromo dos resíduos com a matéria-prima original de areia de cromita (36-50% Cr₂O₃), é observada uma redução de até 50% da presença deste elemento. Esse fenômeno pode ter ocorrido durante os processos de fundição, seja por abrasão dos grãos ou por contato com o metal líquido, durante a sua solidificação no interior dos moldes de areia.

O alto teor de óxido de ferro é explicado tanto pelo fato desta areia (de cromita) poder aparecer na forma FeCr₂O₃ (SENAI, 1987), como também devido o contato do

molde (de areia) com o metal líquido vazado em seu interior, reagindo com a areia e aumentando os teores de ferro que a mesma já possui.

5.1.2 Difração de Raios X (DRX)

As fases presentes nas matérias-primas utilizadas neste trabalho (cimento Portland, agregado miúdo, resíduos A e B) são mostradas nos difratogramas das Figuras 18, 19 e 20, respectivamente.

O difratograma do cimento apresenta os componentes esperados: calcita, dolomita e hatruita ou alita (GÓIS, 2012), comprovando as características previstas pela norma NBR11578, que devem conter silicatos de cálcio e materiais carbonáticos.

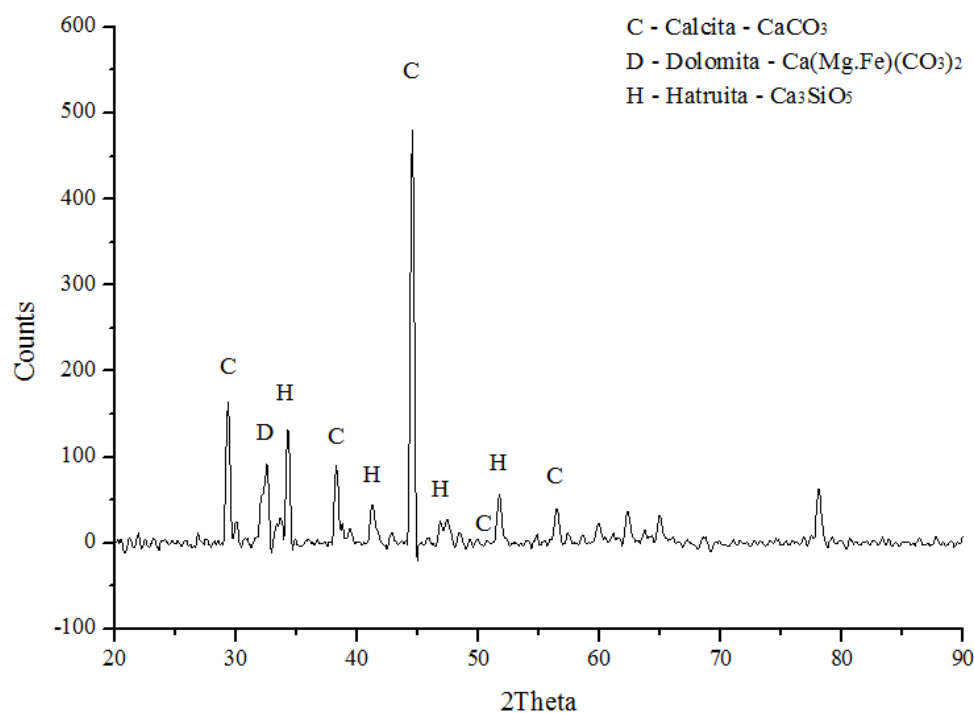


Figura 18 - Difratograma do cimento Portland CPII-F32.

No difratograma do agregado miúdo identifica-se a presença do quartzo, o que se justifica devido este material ser uma areia comum.

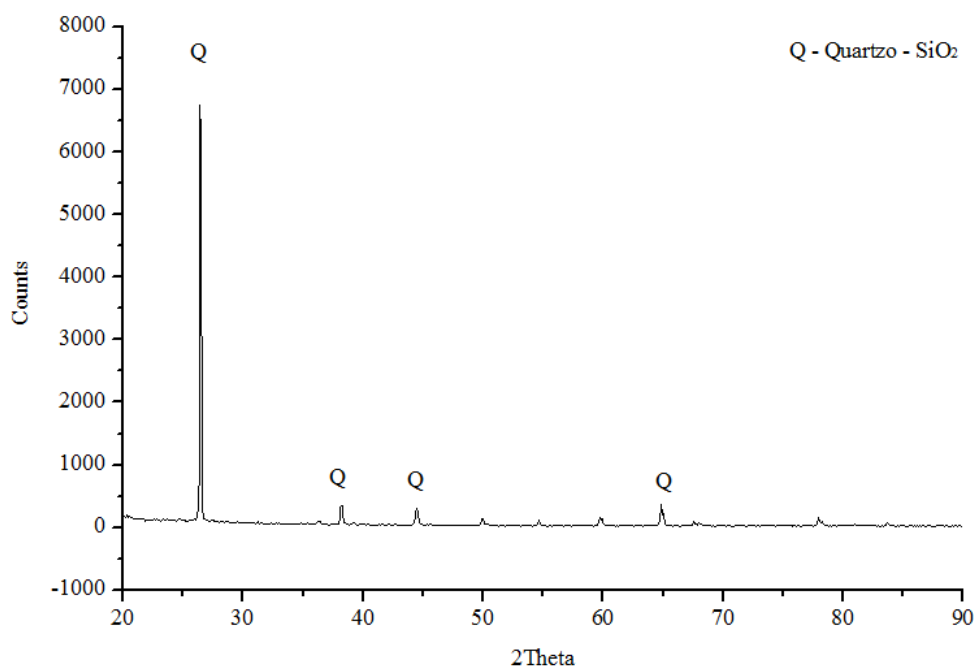


Figura 19 - Difratoograma do agregado miúdo.

Nos difratogramas dos resíduos A e B verificou-se a predominância de espinélios, sendo possível identificar a forsterita e o aluminato de magnésio. Também foram identificados traços de hematita, quartzo e olivina (FILHO et al, 2002).

Estas características estão de acordo com a análise química realizada que mostram teores de óxido de ferro e silício. Em relação aos espinélios não definidos supõem-se ser da família do cromo e/ou do alumínio, que possuem picos semelhantes aos encontrados.

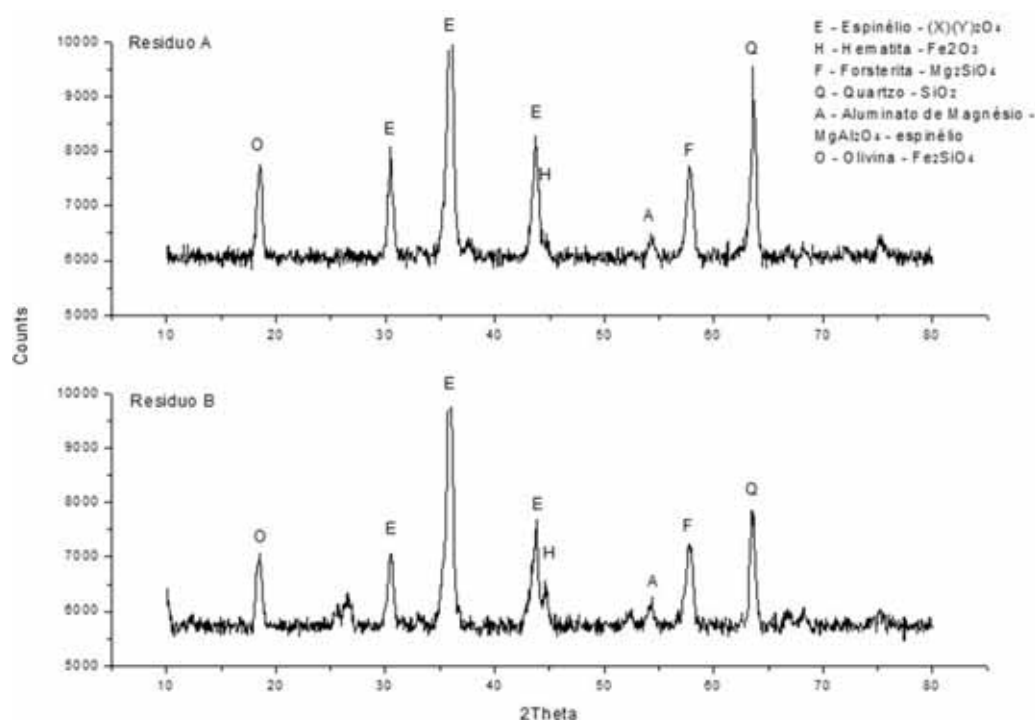


Figura 20 - Difratogramas dos resíduos A e B.

5.1.3 Análise Granulométrica

Os resultados da granulometria do agregado miúdo são apresentados na Tabela 10: massas retidas em cada peneira; e na Figura 21: gráfico com a curva granulométrica do material.

Tabela 10 - Resultados da análise granulométrica do agregado miúdo.

Peneira (mm)	A ₁			A ₂		
	Massa retida na peneira (g)	Massa retida na peneira (%)	Massa retirada acumulada (%)	Massa retida na peneira (g)	Massa retida na peneira (%)	Massa retirada acumulada (%)
1,180	3,4	0,9	0,9	2,9	0,8	0,8
0,600	27,5	7,6	8,6	24,1	6,7	7,5
0,300	146,6	40,7	49,3	283,4	78,7	86,2
0,150	159,5	44,3	93,6	40,2	11,2	97,4
0,075	18,8	5,2	98,8	7,8	2,2	99,5
< 0,075 (fundo)	4,3	1,2	100,0	1,7	0,5	100,0

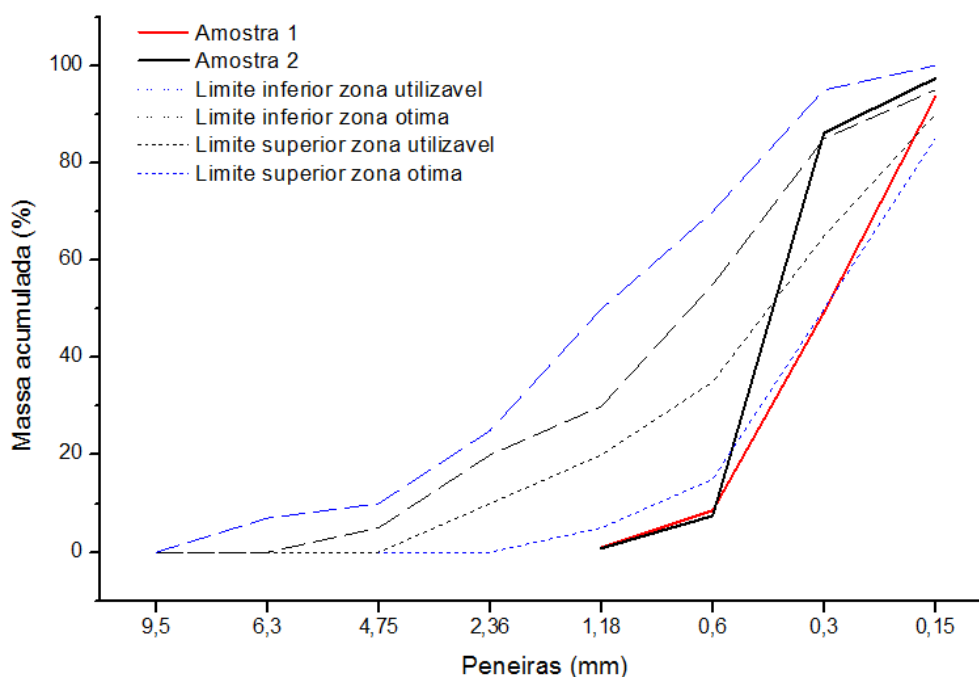


Figura 21 - Curva granulométrica do agregado miúdo e limites de distribuição granulométrica conforme Norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Através destes resultados, foi determinado o diâmetro máximo e o módulo de finura do agregado, os quais são: 1,18 mm e 3,0 mm, respectivamente. Assim, este material pode ser classificado entre uma areia média e grossa (SELMO, 1989 apud SILVA, 2006). As amostras também se encontram dentro dos limites superiores e inferiores das zonas ótimas e utilizáveis dos agregados miúdos conforme Norma NBR 7211.

5.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

As análises químicas feitas com o EDS em dois pontos distintos de amostras dos resíduos A e B confirmam as análises feitas através de FRX (Figuras 22 e 23 respectivamente). Pois, nestes espectros é possível notar a presença de cromo, ferro, alumínio e silício, além da presença do oxigênio para a formação dos óxidos, em ambos os resíduos.

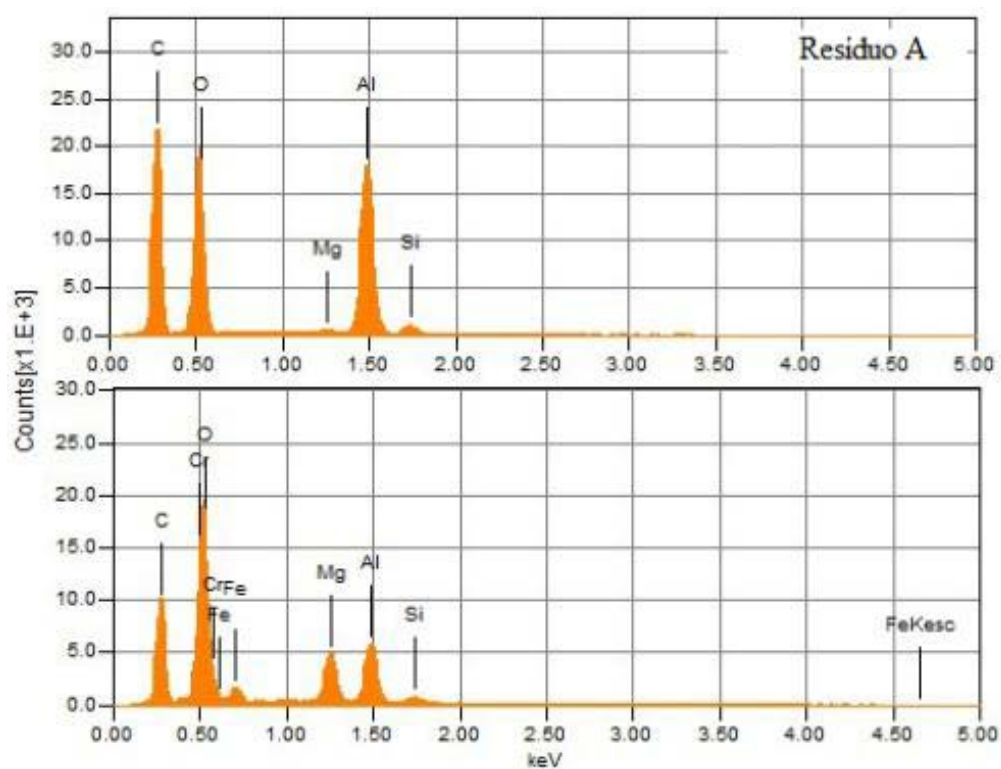


Figura 22 – Espectros de EDS – residuo A.

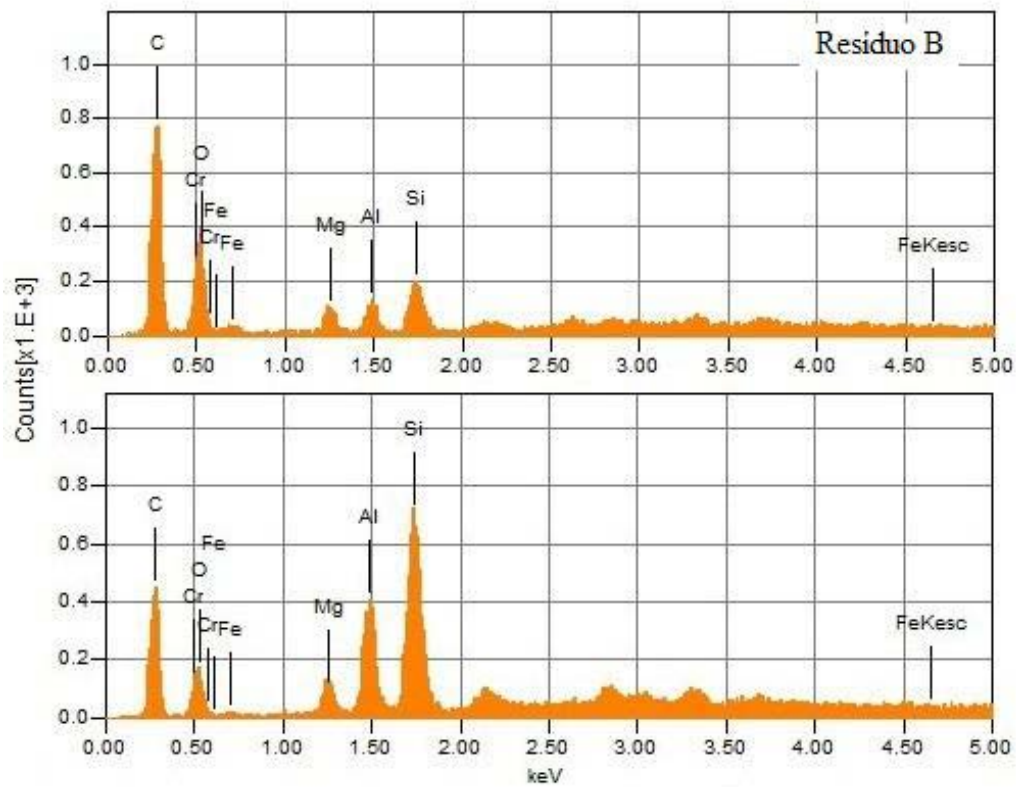


Figura 23 – Espectros de EDS – residuo B.

As análises morfológicas e as observações do tamanho das partículas dos resíduos A e B, feitas através do MEV, estão demonstradas nas Figuras 24 e 25, respectivamente.

Através destas imagens, pode-se observar que ambos os resíduos tem dimensões variáveis, em geral inferiores à $10\mu\text{m}$, sendo considerados materiais muito finos; o formato dos grãos é angular e estes tem estrutura aglomerada (RUBIO e NOGUEIRA, 2000).

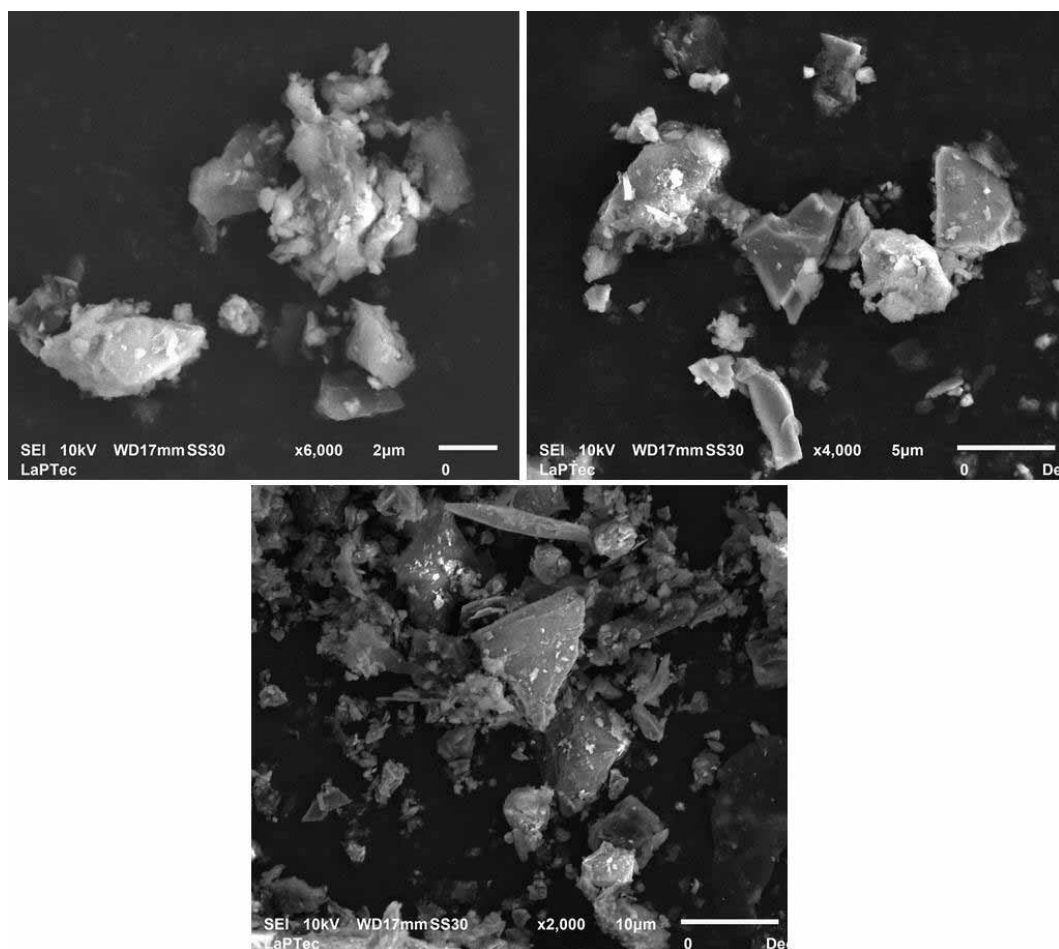


Figura 24 – Micrografia eletrônica de varredura - resíduo A.

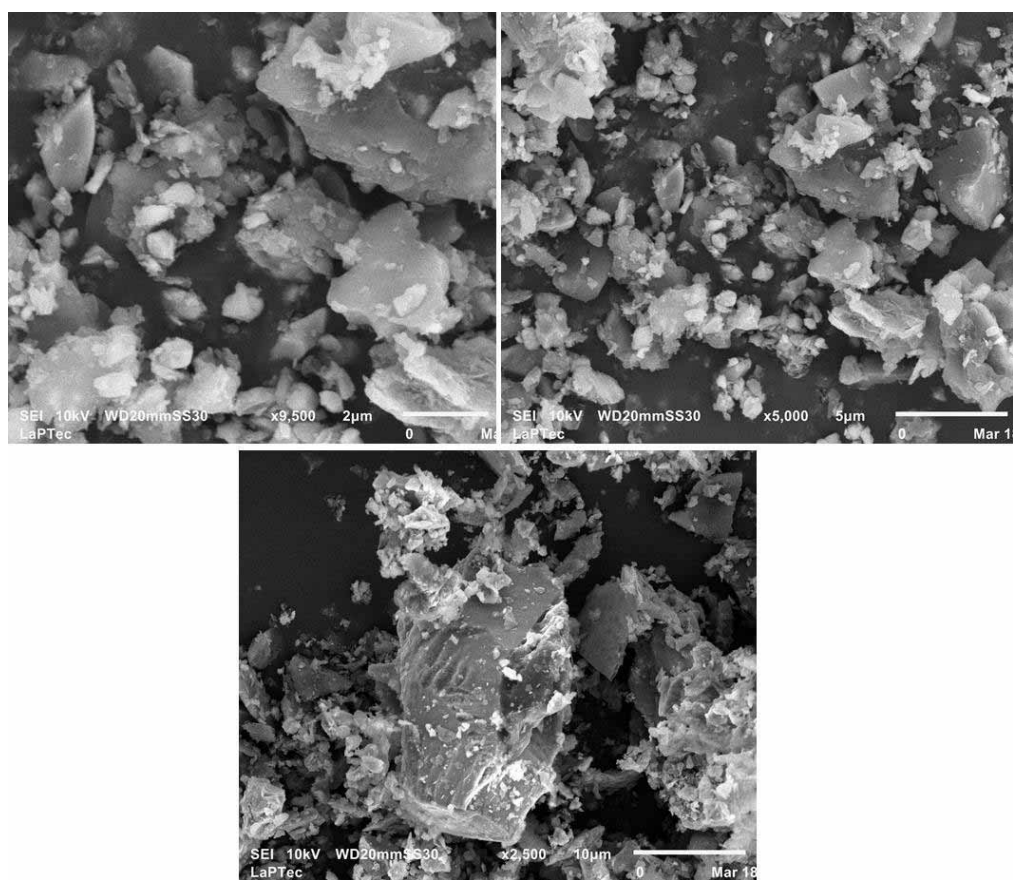


Figura 25 – Micrografia eletrônica de varredura - resíduo B.

5.1.5 Presença de Orgânicos

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos das massas dos cadinhos e das amostras e a porcentagem de orgânicos para os resíduos A e B.

Tabela 11 – Resultado das massas para presença de orgânicos nos Resíduos A e B.

Amostra	Massa em g					% Orgânicos	Média % Orgânicos
	M_c	M_a	M_1	M_2	M_3		
A1	23,271	1,622	24,401	24,399	24,400	69,6	61,1 ± 10,7
A2	21,465	1,645	22,609	22,607	22,206	45,1	
A3	21,469	1,170	22,273	22,271	22,271	68,6	
B1	21,912	1,517	22,901	22,900	22,900	65,2	67,5 ± 1,6
B2	21,491	2,075	22,939	22,938	22,938	69,7	
B3	22,834	1,687	23,979	23,977	23,977	67,7	

Observa-se que a média da porcentagem de orgânicos para os dois resíduos é alta e próxima (acima de 60%). Verifica-se também que praticamente não ocorreram alterações nas massas na terceira pesagem (M_3) em relação às massas da segunda pesagem (M_2).

Estes resultados evidenciam que os resíduos possuem uma grande quantidade de orgânicos, o que pode ser justificada pelas resinas geralmente utilizadas na preparação das areias de fundição, que são responsáveis pelo processo de cura da areia (MARIOTTO, 2000).

5.2 Caracterização da Argamassa no Estado Fresco

Durante a confecção dos corpos de prova verificou-se os seguintes fenômenos:

- **Trabalhabilidade:** os resíduos de areia de fundição são de difícil trabalhabilidade. Devido o alto teor de finos a absorção de água aumenta, deixando a pasta de argamassa mais aderente ou pegajosa (SENAI, 1987 e ABCP, 2002). Os resíduos também ficam facilmente em suspensão dificultando a sua utilização;

- **Expansibilidade e contratilidade ou retração:** nas primeiras horas do processo de cura verificou-se que os corpos de prova sem resíduo retraem-se em média 1 mm, diminuindo sua altura. Este fenômeno pode estar associado à diversos fatores, destacando-se as retrações por perda de água para o meio externo e por hidratação (BASTOS, 2001). O contrário se observou nos corpos de prova com resíduo, que expandiam em sua altura em média 1 mm (Figura 26). Esse fato também foi observado na relação utilização de resíduos versus porcentagens das respectivas sobras (Figura 27): ao aumentar as proporções de resíduos ocorreu aumento percentual das sobras da pasta de argamassa. Ambos os fenômenos podem estar relacionados com as reações químicas que ocorrem durante o processo de hidratação do cimento, incluindo reações entre o cimento e os aglomerantes orgânicos que costumam compor as areias de fundição e seus resíduos, conforme demonstrado nos ensaios de presença de orgânicos;



Figura 26 - Expansibilidade dos corpos de prova com resíduo.

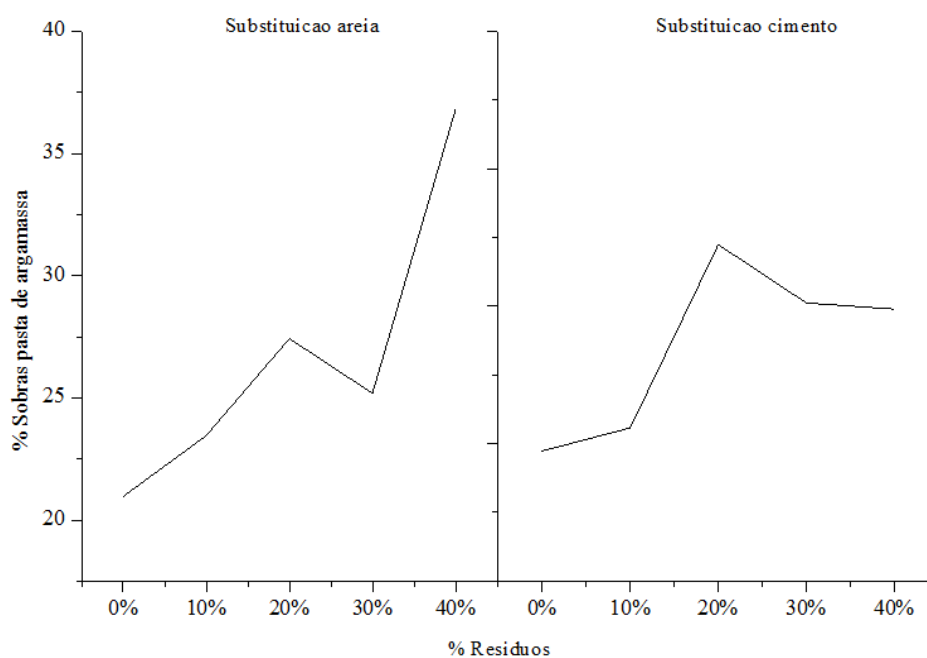


Figura 27 - Relação: utilização de resíduos e percentuais de sobras da pasta de argamassa.

▪ Consumo de água: notou-se também o aumento do consumo de água conforme aumentava a porcentagem de resíduos utilizados (Figura 28), ou seja, para uma mesma quantidade mássica total de materiais sólidos, foi necessário maior quantidade de água para produzir a argamassa, conforme se aumentava a porcentagem de resíduos em substituição aos agregados miúdos ou cimento. Esses resultados justificam-se devido os resíduos serem materiais muito finos e aglomerados, conforme demonstrado nas micrografias do MEV, fazendo com que seja necessária uma maior quantidade de água para permitir a moldabilidade da argamassa produzida com maior quantidade destes resíduos. Isso porque os grãos finos e angulares deste resíduo aumentam sua superfície específica diminuindo sua escoabilidade (RUBIO e NOGUEIRA, 2000).

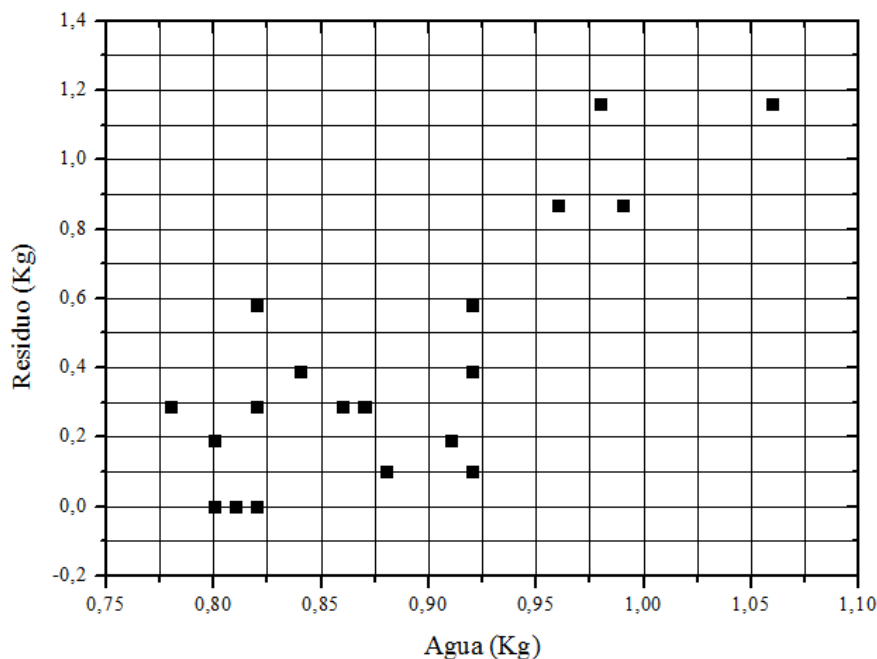


Figura 28 - Relação: consumo de resíduos e água.

▪ Índice de Consistência: através da Tabela 12 observa-se o espalhamento da argamassa para as diferentes incorporações (agregado miúdo e cimento) dos resíduos, sendo considerada a média dos resultados para os resíduos A e B. Nota-se que a variação da consistência nas diferentes percentagens de resíduos incorporados em substituição ao agregado miúdo não ultrapassam $\pm 1,5\%$. Na substituição do cimento a variação máxima é de $+2\%$ em relação à não incorporação dos resíduos (0%).

Tabela 12 – Índice de Consistência – espalhamento da argamassa - Resíduos A e B.

	% Resíduo	Consistência (mm)
Substituição Agregado Miúdo	0	254
	10	251
	20	250
	30	257
	40	256
Substituição Cimento	0	254
	10	254
	20	259
	30	258
	40	256

5.3 Ensaios de Resistência à Compressão

5.3.1 Substituição do Agregado Miúdo

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova com substituição do agregado miúdo para os resíduos A e B e tempo de cura de 7, 14 e 28 dias estão apresentados na Figura 29.

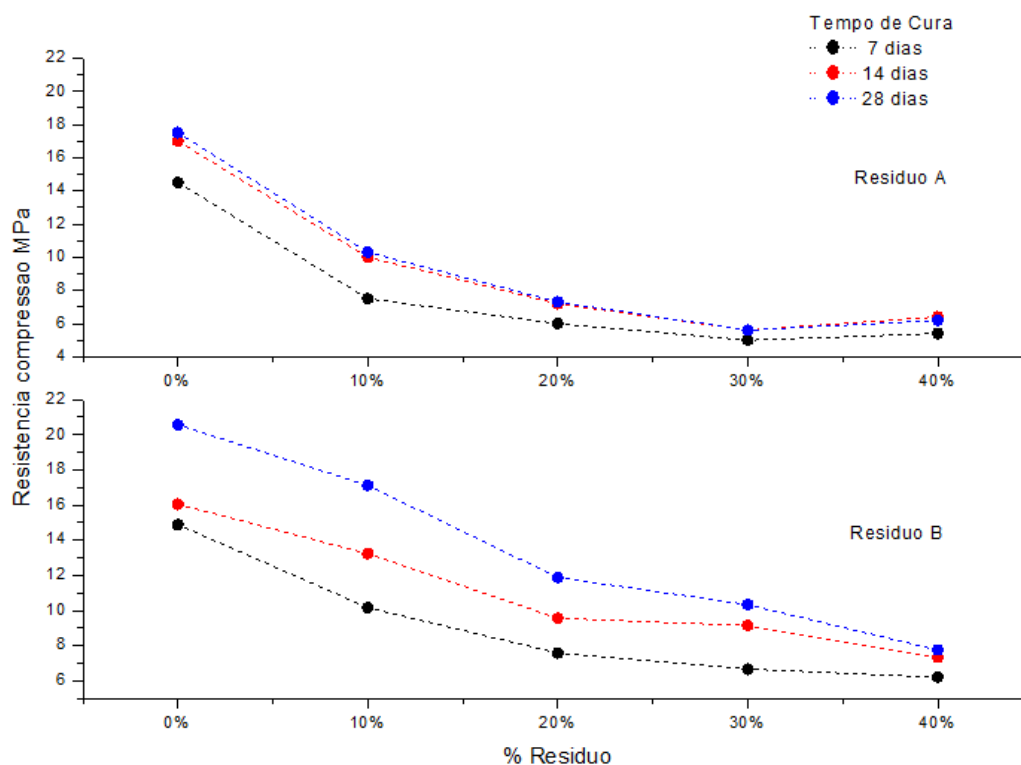


Figura 29 - Resistência à compressão corpos de prova com resíduos A e B, substituição agregado miúdo.

As resistências à compressão diminuem com a incorporação dos resíduos, tendo uma redução maior que 50% nos corpos de prova com resíduo A e maior que 40% nos corpos de prova com resíduo B; ambos na incorporação de 20%, 30% e 40% de resíduos. Isso pode ter ocorrido devido à fragilidade dos resíduos incorporados pelo seu alto teor de finos e consumo excessivo de água. (ABCP, 2011; RUBIO e NOGUEIRA, 2000).

Observa-se que a resistência aumenta sensivelmente com o processo de cura dos corpos de prova devido à sua hidratação (NEVILLE, 2013). Sendo este fenômeno menos perceptível com o aumento da quantidade de resíduos incorporados, mostrando uma tendência à estabilização da resistência ao longo de tempo.

Nota-se também que para o resíduo A as resistências para os tempos de cura de 14 e 28 dias são praticamente as mesmas.

A Tabela 13 apresenta a média das resistências à compressão para 7, 14 e 28 dias com os respectivos desvios padrões.

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão, substituição agregado miúdo.

		Média 7 dias	Média 14 dias	Média 28 dias
Resíduo A	0%	14,5 ± 2,7	17,0 ± 2,2	17,5 ± 0,6
	10%	7,5 ± 2,5	10,0 ± 3,4	10,3 ± 3,0
	20%	6,0 ± 1,5	7,2 ± 2,9	7,3 ± 1,6
	30%	5,0 ± 1,5	5,6 ± 1,7	5,6 ± 0,5
	40%	5,4 ± 0,7	6,4 ± 0,7	6,2 ± 0,2
Resíduo B	0%	14,9 ± 1,9	16,0 ± 1,1	20,6 ± 0,8
	10%	10,2 ± 0,7	13,2 ± 1,7	17,1 ± 2,5
	20%	7,6 ± 0,5	9,6 ± 1,1	11,9 ± 0,7
	30%	6,7 ± 0,5	9,1 ± 2,4	10,3 ± 1,8
	40%	6,2 ± 0,2	7,3 ± 1,6	7,7 ± 0,1

5.3.2 Substituição do Cimento

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova com substituição do cimento pelos resíduos A e B estão apresentados na Figura 30.

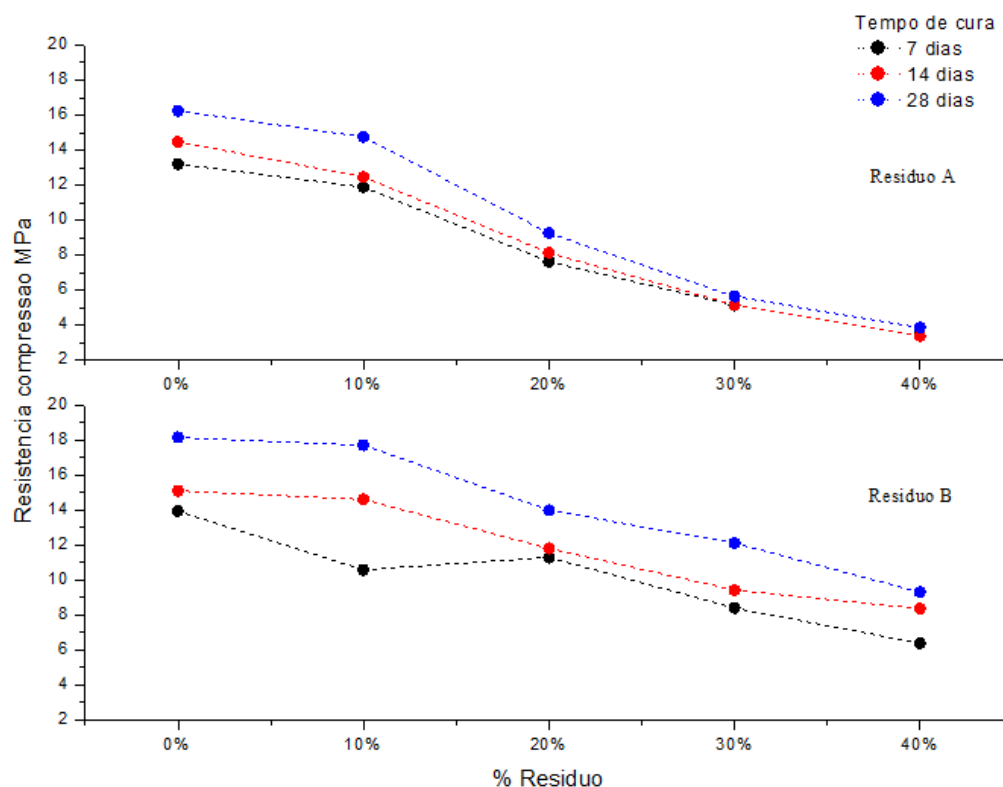


Figura 30 - Resistência à compressão corpos de prova com resíduos A e B, substituição cimento.

Pode-se observar que as resistências diminuem conforme são incorporados maiores quantidades de resíduos, ocorrendo redução entre 61% e 77% para o resíduo A e de 33% a 54% no resíduo B; ambos nas incorporações de 30% e 40%.

Assim como na substituição do agregado miúdo, verifica-se que não existem alterações significativas nas resistências dos corpos de prova com tempo de cura de 14 e 28 dias, principalmente para o resíduo A.

A Tabela 14 apresenta a média das resistências à compressão para 7, 14 e 28 dias com os respectivos desvios padrões.

Tabela 14 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão, substituição cimento.

		Média 7 dias	Média 14 dias	Média 28 dias
Resíduo A	0%	13,2 ± 0,2	14,5 ± 0,9	16,2 ± 1,0
	10%	11,9 ± 1,4	12,5 ± 0,5	14,8 ± 0,5
	20%	7,6 ± 0,7	8,1 ± 0,3	9,2 ± 1,0
	30%	5,1 ± 0,1	5,1 ± 0,2	5,6 ± 0,4
	40%	3,4 ± 0,1	3,4 ± 0,2	3,9 ± 0,4
Resíduo B	0%	13,9 ± 0,3	15,1 ± 0,5	18,1 ± 0,5
	10%	10,6 ± 2,1	14,6 ± 1,7	17,7 ± 0,8
	20%	11,3 ± 0,4	11,8 ± 1,7	14,0 ± 0,4
	30%	8,4 ± 0,8	9,4 ± 0,7	12,1 ± 0,6
	40%	6,4 ± 0,8	8,3 ± 0,4	9,3 ± 1,0

5.4 Ensaios de Absorção de Água, Índice de Vazios e Massas Específicas

5.4.1 Substituição do Agregado Miúdo

A relação direta do índice de vazios pela absorção de água é demonstrada na Figura 31, evidenciando que com o aumento do índice de vazios aumenta também a absorção de água.

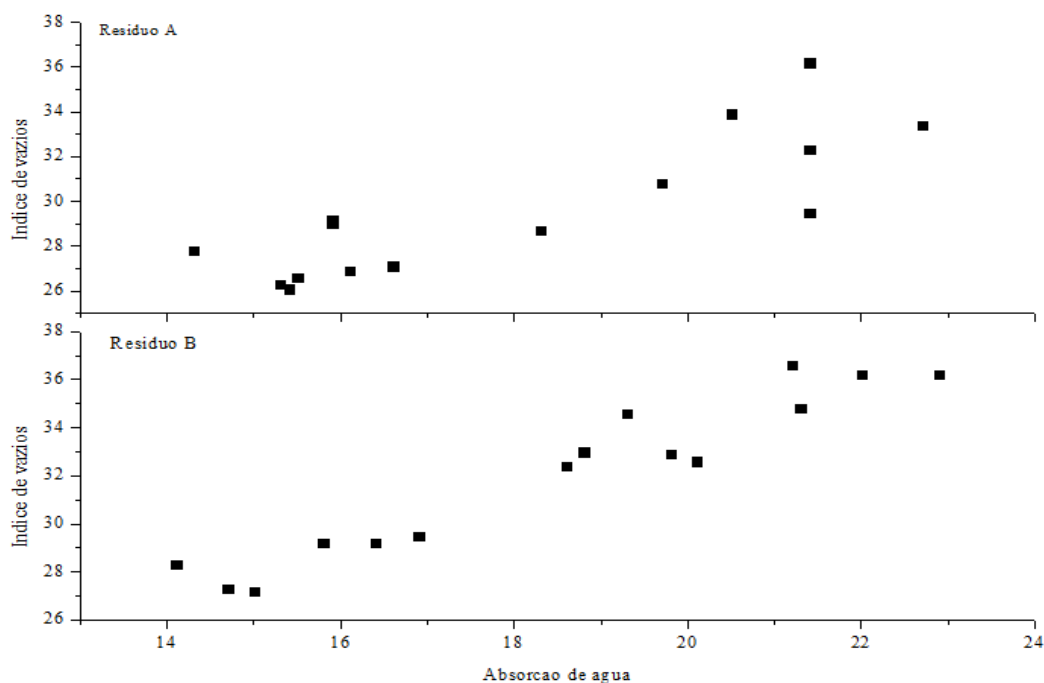


Figura 31 - Relação: índice de vazios x absorção de água, substituição agregado miúdo.

Nos resultados de absorção de água com as porcentagens de resíduos utilizados (Figura 32) nota-se o aumento da absorção de água com o aumento dos resíduos, assim pode-se entender que a confecção dos corpos de prova com material fino acaba por aumentar o consumo de água, fato este verificado na caracterização da argamassa no estado fresco (ABCP, 2011; RUBIO e NOGUEIRA, 2000).

Não ocorreram diferenças significativas na absorção com o passar do tempo ou entre os resíduos A e B.

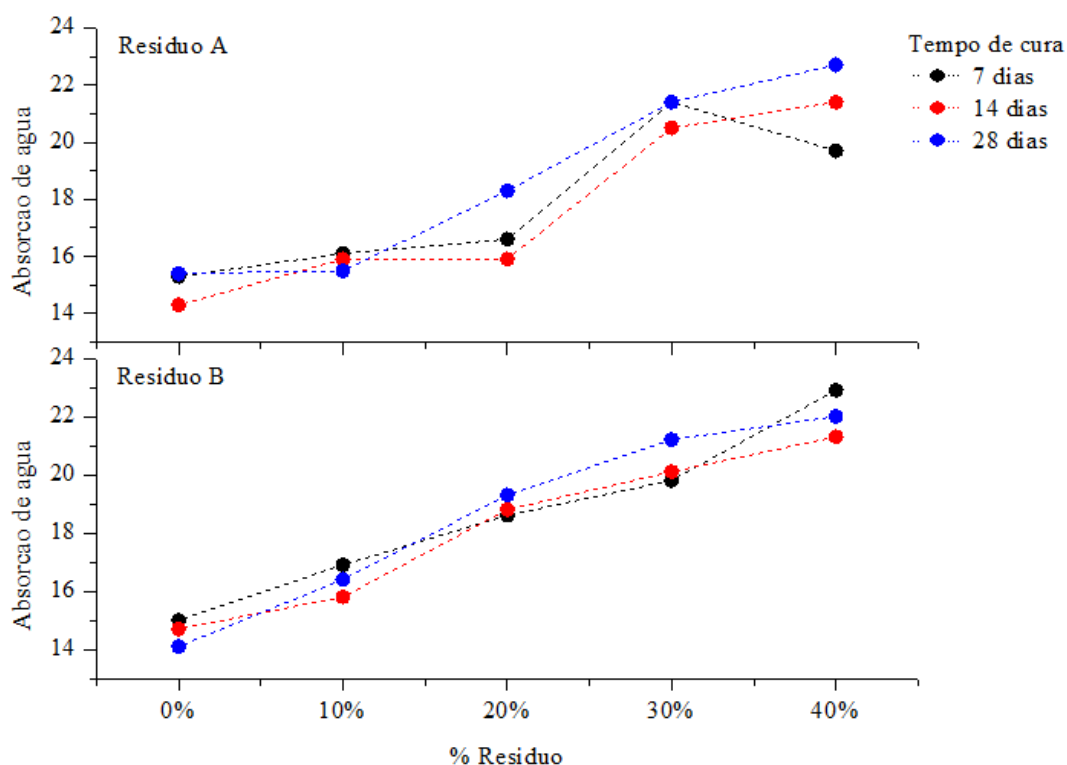


Figura 32 - Absorção de água com resíduos A e B, substituição agregado miúdo.

Analogamente, também ocorreu aumento no índice de vazios com o aumento dos resíduos utilizados (Figura 33).

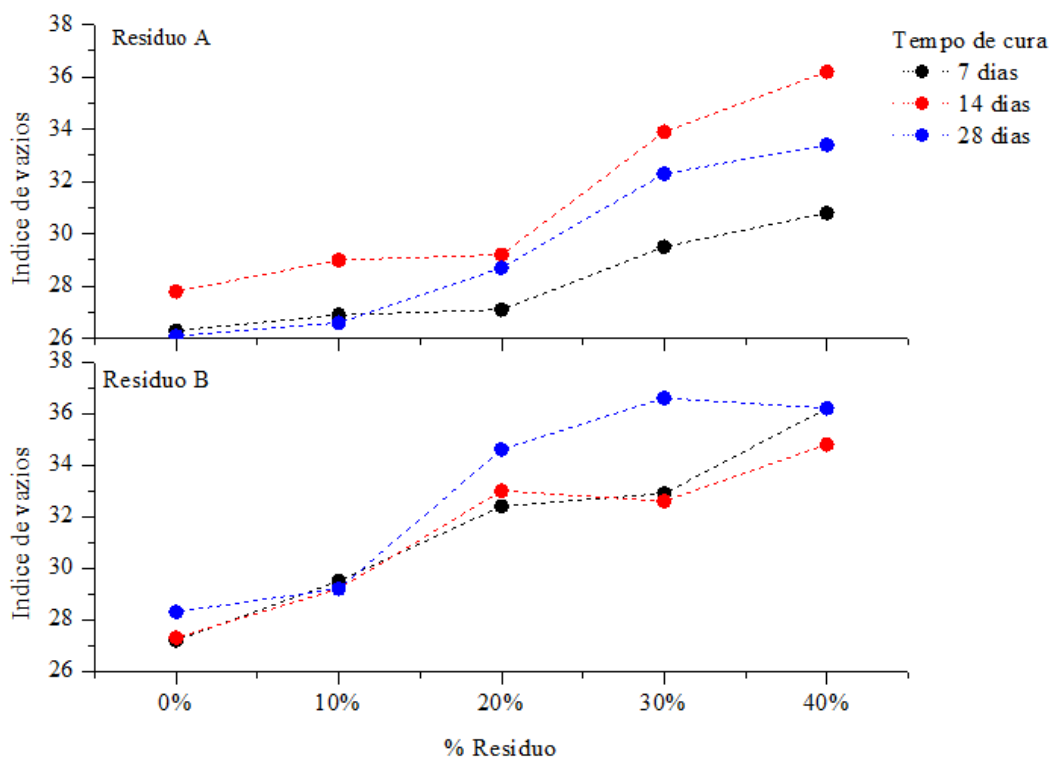


Figura 33 - Índice de vazios com resíduos A e B, substituição agregado miúdo.

A Tabela 15 apresenta os resultados de massas específicas das amostras secas e das amostras saturadas, com as porcentagens de resíduos A e B e os diferentes tempos de cura.

Tabela 15 - Massas específicas amostras secas e saturadas, substituição agregado miúdo.

		Amostra Seca			Amostra Saturada		
		7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Resíduo A	0%	1,7	1,9	1,7	2,0	2,2	2,0
	10%	1,7	1,8	1,7	1,9	2,1	2,0
	20%	1,6	1,8	1,6	1,9	2,1	1,9
	30%	1,4	1,7	1,5	1,7	2,0	1,8
	40%	1,6	1,7	1,5	1,9	2,1	1,8
Resíduo B	0%	1,8	1,9	2,0	2,1	2,1	2,3
	10%	1,8	1,9	1,8	2,0	2,1	2,1
	20%	1,7	1,8	1,8	2,1	2,1	2,1
	30%	1,7	1,6	1,7	2,0	2,0	2,1
	40%	1,6	1,6	1,6	1,9	2,0	2,0

É possível evidenciar uma tendência na diminuição das massas específicas da amostra seca e saturada conforme aumenta a porcentagem de resíduo utilizado. Isso

provavelmente esteja ocorrendo devido o aumento do número de vazios e absorção de água, conforme verificado nos gráficos anteriores.

5.4.2 Substituição do Cimento

A mesma relação índice de vazios por absorção de água feita para a substituição do agregado miúdo foi feita para a substituição do cimento. Conforme mostra a Figura 34, nota-se uma tendência de aumentar a absorção de água com o aumento do número de vazios, contudo, os resíduos A e B têm comportamentos distintos: no resíduo B a relação é mais linear e com menor amplitude.

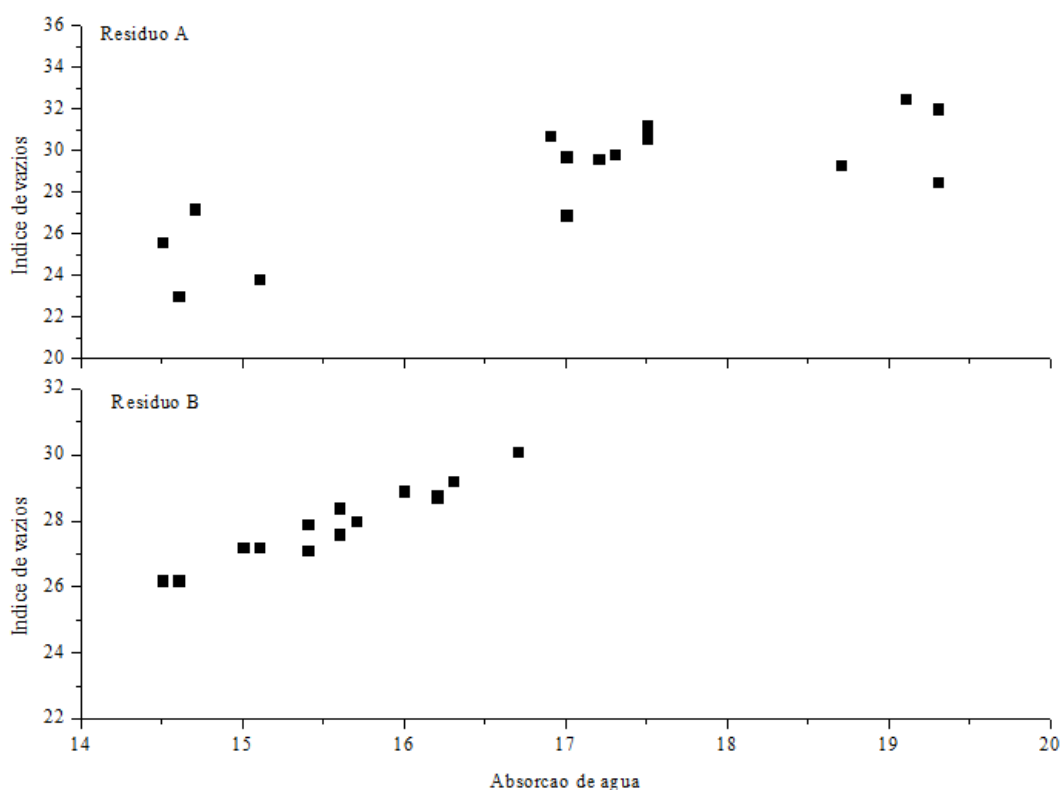


Figura 34 - Índice de vazios com resíduos A e B, substituição cimento.

Estes índices também foram comparados às porcentagens incorporadas de resíduos (Figuras 35 e 36) mostrando uma leve tendência de aumento com a incorporação destes resíduos. Se comparado com a substituição do agregado miúdo, essa tendência é menor porque a quantidade em massa de resíduos utilizados também é menor na substituição em cimento, diminuindo assim a porcentagem de finos do material.

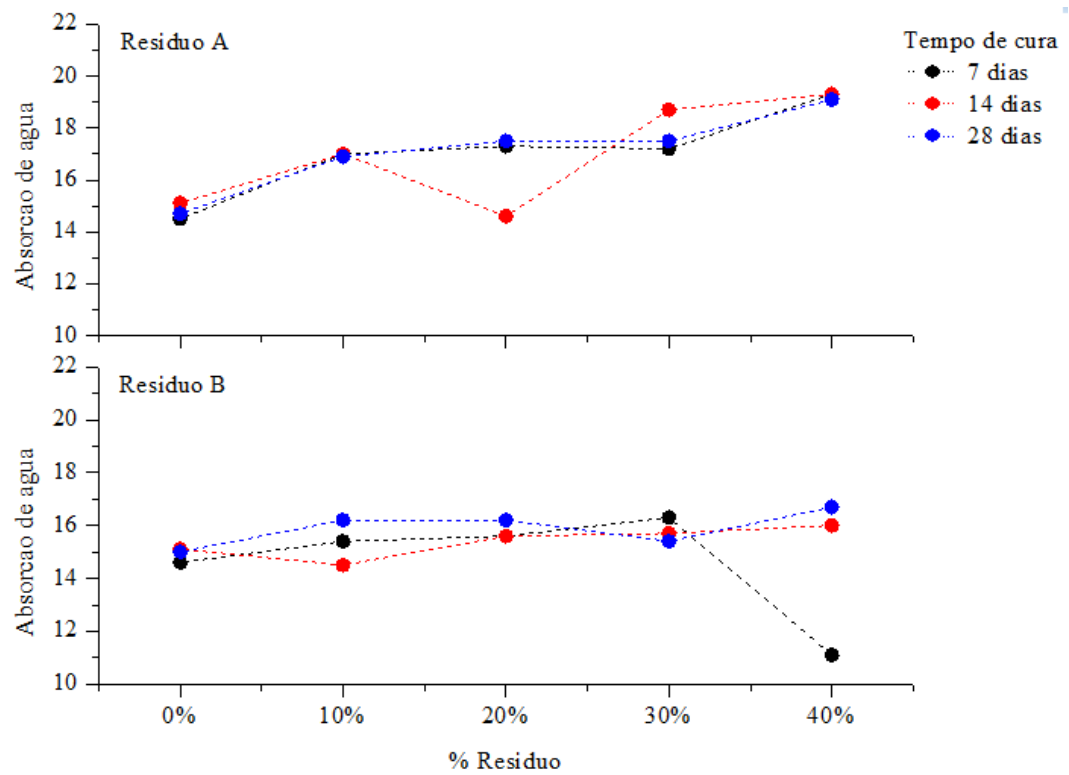


Figura 35 - Absorção de água com resíduos A e B, substituição cimento.

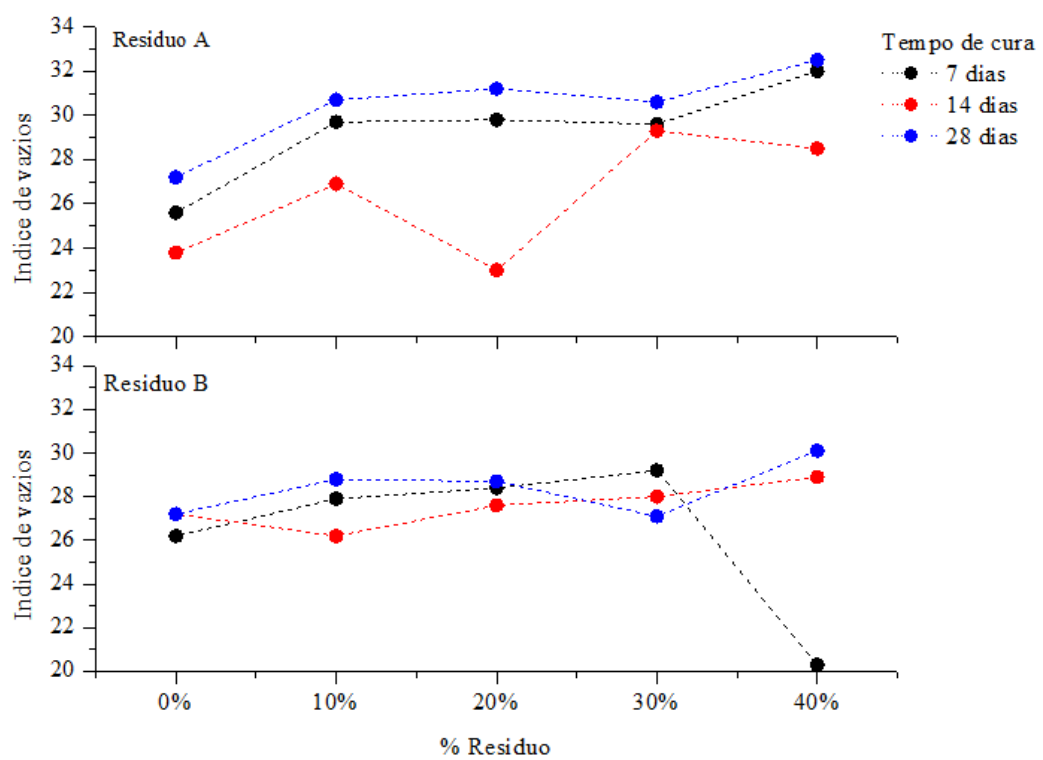


Figura 36 - Índice de vazios com resíduos A e B, substituição cimento.

De maneira análoga os resultados de massas específicas das amostras secas e das amostras saturadas não apresentam muitas diferenças com as porcentagens de resíduos A e B e os diferentes tempos de cura, conforme mostra a Tabela 16.

Tabela 16 - Massas específicas amostras secas e saturadas, substituição cimento.

		Amostra Seca			Amostra Saturada		
		7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Resíduo A	0%	1,8	1,6	1,9	2,0	1,8	2,1
	10%	1,7	1,6	1,8	2,0	1,8	2,1
	20%	1,7	1,6	1,8	2,0	1,8	2,1
	30%	1,7	1,6	1,7	2,0	1,9	2,1
	40%	1,7	1,5	1,7	2,0	1,8	2,0
Resíduo B	0%	1,8	1,8	1,8	2,1	2,1	2,1
	10%	1,8	1,8	1,8	2,1	2,1	2,1
	20%	1,8	1,8	1,8	2,1	2,0	2,1
	30%	1,8	1,8	1,8	2,1	2,1	2,0
	40%	2,0	1,8	1,8	2,2	2,1	2,1

6 CONCLUSÕES

A caracterização química do resíduo de areia mostrou que o mesmo é composto principalmente de óxidos de ferro, cromo, silício e alumínio (maior que 84%) elementos possivelmente presentes na matéria-prima (areia-base) que originou estes resíduos, como a areia de cromita (SAMPAIO et al, 2008; LIMA, 2009; SENAI, 1987).

Os espectros do EDS e as análises de DRX dos resíduos A e B corroboram esta análise química, sendo que no EDS aparecem picos de cromo, ferro, alumínio, silício e oxigênio, e o DRX traz picos de espinélio, hematita, quartzo e olivina.

Os difratogramas para o agregado miúdo e para o cimento Portland identificaram picos de quartzo para o agregado; calcita, dolomita e hatruita para o cimento, conforme esperado.

Os ensaios de granulometria do agregado miúdo tiveram como resultado uma areia entre média e grossa enquanto que as análises morfológicas dos resíduos A e B demonstraram um material muito fino (em geral abaixo de 10 μ m) com grãos angulares e de estrutura aglomerada, conforme micrografias do MEV.

Também foi possível verificar que os resíduos possuem alto teor em massa de orgânicos, média acima de 60%, possivelmente devido às resinas utilizadas no processo de cura das areias de fundição (KLINSKY, 2008; MARIOTTO, 2000).

Através dos ensaios de resistência à compressão observou-se que as médias das resistências reduzem conforme aumentam as porcentagens dos resíduos A e B. Sendo encontradas as maiores reduções em relação aos corpos de prova sem resíduo, na substituição de cimento com 40% do resíduo A – acima de 70% de redução – e na substituição do agregado miúdo com 30% do resíduo A – acima de 65% de redução.

Nota-se também que as resistências à compressão dos corpos de prova confeccionados com o resíduo B, em geral, são maiores do que aqueles confeccionados com o resíduo A; chegando à um acréscimo de quase 59% na resistência dos corpos de prova com 40% de resíduos em substituição do cimento.

O incremento nos índices de vazio e absorção de água está diretamente relacionado ao aumento da porcentagem de resíduos utilizados.

A fragilidade da argamassa de cimento confeccionada com os resíduos, bem como sua porosidade ocorre devido ao alto teor de finos dos resíduos e à sua geometria. Estas propriedades aumentam o consumo de água na argamassa fresca, gerando os vazios e

reduzindo a resistência após o tempo de cura (RUBIO e NOGUEIRA, 2000; BALDAM e VIEIRA, 2013).

Comparando os resultados médios das menores e maiores resistências dos corpos de prova com resíduos, sendo: substituição do agregado entre 5,0 e 17,1 MPa e substituição do cimento entre 3,4 e 17,7 MPa; com a norma NBR 13281, para assentamento e revestimentos, pode-se concluir que a incorporação dos resíduos atende as especificações, que variam de $\geq 0,1$ MPa a $> 8,0$ MPa.

A escolha por substituição do agregado miúdo ou do cimento deve levar em consideração não apenas a quantidade de resíduos incorporados; maior para a substituição de agregado miúdo; mas, também, o valor das matérias-primas empregadas; maior para o cimento.

Desta forma é possível concluir que a incorporação dos resíduos de areia de fundição em argamassa de cimento pode ser vantajosa por diminuir o consumo das matérias-primas: agregado miúdo e cimento; além de contribuir para a redução do descarte destes resíduos em aterros sanitários.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002). **BT 106: Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. São Paulo, 7ª ed. São Paulo, SP, 2002.

_____. **Manual de Revestimentos de Argamassa**. São Paulo, SP, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991a). **NBR 5732: Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro.

_____. (1991b). **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro.

_____. (1991c). **NBR 5736: Cimento Portland de pozolânico**. Rio de Janeiro.

_____. (2009). **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificações**. Rio de Janeiro.

_____. (1996). **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro.

_____. (2005). **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro.

_____. (1997). **NBR 11578: Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro.

_____. (2002). **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro.

_____. (2001). **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**. Rio de Janeiro.

_____. (2003). **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro.

_____. (2001). **NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro.

AMERICAN Foundrymen's Society. **Alternative Utilization of Foundry Waste Sand**. Final Report (Phase I) prepared by American Foundrymen's Society Inc. for Illinois Department of Commerce and Community Affairs, Des Plaines, Illinois, July, 1991.

AMERICAN Society for Testing and Materials (2008). **D3171: Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials**.

ARMANGE, L.C.; NEPPEL, L.F.; GEMELLI, E.; CAMARGO, N.H.A. Utilização de Areia de Fundição Residual para uso em Argamassa. **Revista Matéria**, v. 10, n. 1, p. 51-62, mar. 2005. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10631>>. Acesso em: 18 abr. 2012.

BAÍÁ, L. L. M. SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa**. 4ª ed. O Nome da Rosa. São Paulo, SP, 2008.

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição – Processos e Tecnologias Correlatas**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2013.

BANDA NORIEGA, R.B.; MIGUEL, R.E.; SOTA, J.D.; MARCOZZI, R.G. **Arenas Descartadas de Fundición como Subproducto Utilizado en la Fabricación de Materiales de Construcción – Estudio de Caso**. In: 15º Congresso de Fundição da Associação Brasileira de Fundição, 2011, São Paulo. 1 CD-ROM.

BASTOS, P. K. X. **Retração e Desenvolvimento de Propriedades Mecânicas de Argamassas Mistas de Revestimentos**. 172 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BATTAGIM, A. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland>>. Acesso em: 22 out. 2012.

BONET, I. I. **Valorização do Resíduo Areia de Fundição (RAF). Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo C.B.U.Q.** 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/83629/187804.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 27 dez. 2012.

BROWN, J. R., **Foseco ferrous foundryman's handbook**. 11ª ed. Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, 2000.

CARASEK, H. **Apresentação aula capítulo 26 - argamassas**. Universidade Federal de Goiás. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2010. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/matconst2/argamassa_ibracon_cap26_apresentacao.pdf>. Acesso em: 20 out. 2012.

CARNIN, R. L. P.; SILVA, C. O.; POZZI, R. J.; JUNIOR, D. C.; FOLGUERAS, M. V.; MALKOWSKI, W. Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. **Revista Pavimentação**, ano V, Out/Nov/Dez de 2010. Disponível em: <http://www.tupy.com.mx/downloads/guesser/Desen_Artefatos_Pavers_AreiaDesc_Fund.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2012.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA – CIMM. **Processos de Fundição**. Material Didático. 10.12.2010. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3676#.U4Poa_ldV1Y>. Acesso em: 13 jan. 2014.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

COUTINHO NETO, Benedito. **Avaliação do Reaproveitamento de Areia de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas Densas**. 304 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

D'ELBOUX, F. A. **Minimização de descarte de areias de fundição**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, 2000.

EISBERG, R.; RESNICK, R.; **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Tradução Paulo Costa Ribeiro, Enio Frota da Silveira e Marta Feijó Barroso. 24 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

ENCONTRO Discute Reuso de Areias de Fundição. **Revista da ABIFA: Fundição & Matérias-primas**, São Paulo, ano 15, ed. 147, p. 84-85, ago. 2012.

FILHO, A. F. S.; MOURA, W. A.; LEITE, R. S. Caracterização de Escória de Ferro-cromo como Agregado graúdo para a produção de concreto. **Sitientibus**, Feira de Santana, n. 26, p. 95-110, jan/jun. 2002.

FILHO, V. F. N. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. Laboratório de Instrumentação Nuclear/CENA, Departamento de Ciências Exatas, ESALQ, USP, Piracicaba, SP, 1999. Disponível em: <http://www.apostilas.cena.usp.br/Virgilio/cen-5723/EDXRF_TXRF.doc>. Acesso em: 03 nov. 2012.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. 1ª ed. Pini. São Paulo, SP, 1994.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A.; **Ensaio dos Materiais**. 2ª ed. LTC. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

GÓIS, L. C. **Estudo da Incorporação da Cal em Composições Binárias de Solocimento para Produção de Tijolos Maciços**. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2012.

HAGEMANN, S. E. **Apostila de Materiais de Construção Básicos**. Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, 2011.

IMF Brasil Ltda. Recuperação Mecânica de Areia. Catálogos, 2002. Disponível em: <http://www.imfbr.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=30&Itemid=11>. Acesso em: 26 nov. 2013.

KLINSKY, L. M. G. **Proposta de Reaproveitamento de Areia Fundição em Sub-bases e Bases de Pavimentos Flexíveis Através da sua Incorporação a Solos Argilosos**. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

LENG, Y. **Materials Characterization - Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods**. 1ª ed. Wiley. Singapore, 2008.

LIMA, J. M. G. **PRODUTO 12 Minério de Cromo. Relatório Técnico 21. Perfil da Mineração de Cromo**. Ministério de Minas e Energia – MME, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral SGM, 2009.

R. M. F.; LUZ, J. A. M. **Medida de Ângulo de Contato**. Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais Parte 8 – Medições em Laboratório, Cap. 28, p. 491 - 503, Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - Ministério da Ciência e Tecnologia, 2007.

LOPES, L.R.N.; ESTRELA, D.P. **Melhoria da qualidade: redução de horas de retrabalho na produção de válvulas industriais**. 111 f. Monografia (MBA em Gestão da Qualidade) – Programa de Educação Continuada em Engenharia - PECE, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MACHADO, I. **Introdução à Manufatura Mecânica – Processos de Fundição e Sinterização (Metalurgia do Pó)**, 2006. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/Notasdeaula.html>>. Acesso em: 28 mai. 2012

MACIEL, C. B. **Avaliação da Geração do Resíduo Sólido Areia de Fundição Visando sua Minimização na Empresa Metalcorte Metalurgia-Fundição**. 119 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

MARIOTTO, C. L. **Areias Aglomeradas com Argilas – Tecnologia Básica**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Notas de Aula, 2005. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/111893703/Apostila-Completa>>. Acesso em: 20 abr. 2012.

_____. **Curso de Areias de Moldagem**: Volumes 1 e 2. 15ª ed. São Paulo: ABM, 1986.

_____. **Regeneração de areias de Fundição**. In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de resíduos sólidos industriais – SMA/SP, 2000.

MEDEIROS, M. **Historia da Fundição - The History of Foundry**. São Paulo: Salus Editora Cultural, 2009.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Processos de Fabricação - Fundição**. Santa Catarina: Centro Federal de Educação e Tecnológica de Santa Catarina, 2007. Disponível em: <<http://www.norbertocefetsc.pro.br/fundicao.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concreto**. 2ª ed. Bookman. São Paulo, SP, 2013.

NICOLLI, F. C. **Método para análise em campo de produtos de corrosão atmosférica por difração em raios X**. Tese (Mestrado em Ciências), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1997.

PADILHA A. F., FILHO, F. A. **Técnicas de Análise Micro Estrutural**. 1ª ed. Hemus. 2004.

PARTRIDGE, B. K.; ALLEMAN, J. E. **Field Demonstration of Highway Embankment Constructed Using Waste Foundry Sand**: Final Report. Prepared as part of an Investigation Conducted by the Joint Transportation Research Program, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1998.

ROSSETTO, T.S.; GONÇALVES, M.K.; BURAS, M.; SILVEIRA, R.M.; CHEGATTI, S. **Metodologia de Análise do Coeficiente de Condutividade Hidráulica e Obenção de Percolado de Areias Descartadas de Fundição com Diferentes Teores de Bentonita**. In: 15º Congresso de Fundição da Associação Brasileira de Fundição, 2011, São Paulo. 1 CD-ROM.

RUBIO, J. C. C.; NOGUEIRA, W. A. **Práticas de Areia: Processos Primários de Fabricação**. Aulas práticas. Laboratório de Fundição – Departamento de Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2000.

RUNDMAN, K. B. **Metal casting**. Boston: Department of Materials Science and Engineering. Michigan Technology University, MY 4130, 154 f., 2000.

SAMPAIO, J.A.; ANDRADE, M.C.; PAIVA, P.R. **Cromita**. Comunicação Técnica elaborada para o Livro Rochas Minerais Industriais: Usos e Especificações - Parte 2 - Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações, Cap. 18, p. 403 - 425, Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - Ministério da Ciência e Tecnologia, 2008.

SANTOS, D. A. O.; ROZZI, G. L. D.; FERREIRA, P.P.; ALBUQUERQUE, T. M. **Automatização do Processo de Abertura e Fechamento em Moldes Permanentes em Fundição por Ação de Gravidade**. 78 f. Trabalho de Aprovação de Disciplina de Projeto de automação na manufatura (Graduação em Tecnologia em Gestão da Produção Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2010.

SCHEUNEMANN, Ricardo. **Regeneração de Areia de Fundição Através de Tratamento Químico Via Processo Fenton**. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina – Centro Tecnológico, Florianópolis, 2005.

SENAI. **Areias de fundição aglomeradas com argila**. Belo Horizonte. Senai, 1987 v. 4.

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

SILVA, N. G. **Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária**. 164 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006.

SILVA, T. C. da. **Comparativo entre os regulamentos existentes para reutilização de resíduos de fundição**. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS). **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 421-426, mar. 2012.

TORRES, J. **Manual Prático de Fundição e elementos de prevenção da corrosão**. 1. ed. Brasil: Hemus, 2004.

ZULIAN, C. S.; DONÁ, E. C.; VARGAS, C. L. **Revestimentos**. Notas de Aulas da Disciplina Construção Civil, abr, 2002. Disponível em: <<http://www.uepg.br/denge/aulas/revestimentos/Revestimentos.doc>>. Acesso em: 21 nov. 2013.