



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE FUNDIÇÃO  
COMO MATÉRIAS-PRIMAS PARA FABRICAÇÃO DE  
BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

**LEANDRO MOOSHER**

São Leopoldo, Agosto de 2013.



LEANDRO MOOSHER

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE FUNDIÇÃO  
COMO MATÉRIAS-PRIMAS PARA FABRICAÇÃO DE  
BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientadora:** Prof. Dr. Carlos A. M. Moraes

**Co-Orientador:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Marlova Piva Kulakowski

**Banca examinadora:** Prof. Dr. Alexandre S. de Vargas

Prof. Dr<sup>ª</sup>. Feliciane Andrade Brehm

São Leopoldo, Agosto de 2013.

M825u Moosher, Leandro.  
Utilização de resíduos sólidos de fundição como matérias-primas para fabricação de blocos de concreto para pavimentação / Leandro Moosher. – 2013.  
143 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.  
"Orientadora: Prof. Dr. Carlos A. M. Moraes ; co-orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlova Piva Kulakowski."

1. Fundição. 2. Resíduos industriais. 3. Blocos de concreto.  
I. Título.

CDU 624

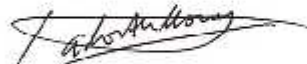
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)

LEANDRO MOOSHER

**“UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE FUNDIÇÃO  
COMO MATÉRIAS-PRIMAS PARA FABRICAÇÃO DE  
BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO”**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 15 de agosto de 2013.



Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes  
Orientador - UNISINOS



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak  
Coordenador do PPGEC/UNISINOS



Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski  
Coorientadora - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Alexandre Silva de Vargas - FEEVALE



Profa. Dra. Feliciane Andrade Brehm - UNISINOS



“A essência do conhecimento consiste em aplicá-lo, uma vez possuído.” (Confúcio).





## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por tudo o que Ele nos proporciona, por eu ser uma pessoa com boa saúde física e mental e por me conceder força nessa jornada um tanto difícil, porém recompensadora.

Dedico este trabalho às pessoas que de alguma forma contribuíram para tornar o meu sonho realidade e acreditaram e me deram força para que eu conseguisse. Pessoas que, com simples palavras e gestos me motivaram a continuar, mesmo nas horas mais difíceis, portanto, uma dedicação especial para minha mãe, Marlize e minha noiva Franciele Paz.

Agradeço aos meus familiares, amigos e colegas de trabalho pelo apoio, motivação e compreensão. A todos que tantas vezes ouviram minhas reclamações e me viram cansado, por vezes de mal humor, mas nunca pensando em desistir desta jornada. Peço desculpas à minha família e amigos pela ausência em muitos momentos, sei que os momentos não voltarão, mas a renúncia faz parte das conquistas. Saibam que amo vocês!

Agradeço também a todos que estiveram envolvidos com esse projeto, que trabalharam com dedicação para que tudo fosse realizado da melhor maneira possível. Obrigado aos laboratoristas do LMC – Daiana, Maurício, Rodrigo, Felipe e Ingrid, com quem tive o prazer de conviver quase que diariamente durante meses, e que realizaram seu trabalho com alegria e da melhor maneira possível.

Ao meu orientador Carlos Alberto Mendes Moraes que mais uma vez apostou na minha capacidade para o desenvolvimento de uma pesquisa, que não somente me orientou de maneira exemplar, mas também deixou belos ensinamentos de vida e como profissional e educador.

Aos professores do curso de mestrado, que não pouparam seus conhecimentos e nos transmitiram toda sua sabedoria, e em especial à professora Marlova Piva Kulakowski, pela sua co-orientação neste trabalho.

Aos meus colegas e amigos do NUCMAT – Suzi, Daiane, Cynthia, Alini, Johny e Guilherme. Obrigado pelas trocas de informações, conhecimentos, material bibliográfico, ensaios de laboratório, obrigado pela companhia de vocês em todos os momentos dessa jornada, essa conquista também tem a participação de vocês. Agradeço também aos demais colegas do mestrado, principalmente com quem tive mais contato durante esses dois anos, entre eles: Suzi, Guilherme, Marieli, Mariana, Rafaela, Matheus, Elisa e Maura.

Meu agradecimento especial também aos que muito me ajudaram na realização de dezenas de ensaios em laboratórios, que são bolsistas de iniciação científica, entre eles o Jalis e a Ana, pela ajuda e pela dedicação, e principalmente a Tuane, que muito colaborou para o desenvolvimento desse trabalho. Muito do que está descrito nesta pesquisa também é fruto da colaboração de vocês. Muito obrigado!

Ao Fábio Vieceli, pelo fornecimento aditivo utilizado no concreto para esta pesquisa.

À Fundação Lorscheitter, pela doação das areias fenólica e verde usadas utilizadas na pesquisa.

À Palmares Artefatos de Concreto, pela parceria nesta pesquisa, fornecendo cimento, agregados miúdos e graúdos e pela disponibilização de seus equipamentos e funcionários para moldar os blocos de concreto intertravado.

À Instituição Milton Valente, pela concessão da bolsa de estudos.

E por fim e mais uma vez, obrigado a minha noiva Franciele Paz, pela paciência durante todo o tempo que estamos juntos, por compreender minha distância e ausência em momentos que pareciam não ter fim. Obrigado pela tua compreensão, pelo carinho, pelo amor e pelas palavras de motivação e por torcer e acreditar no meu melhor. Te amo muito!

Enfim, muito obrigado a todos que fazem parte da minha vida, familiares, amigos e colegas, sem vocês nada disto seria possível. Dedico a vocês este trabalho, que não foi fácil, mas tenho certeza que valeu a pena e espero ter contribuído para um futuro melhor para nós, para as futuras gerações e para a natureza.

## **FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA**

CNPQ

Instituição Padre Milton Valente

NucMat





# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	22
1.2	OBJETIVOS	26
1.2.1	Objetivo geral	26
1.2.2	Objetivos específicos	26
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	27
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>29</b>
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS (PROBLEMÁTICA)	29
2.2	FUNDIÇÃO	31
2.2.1	Indústria da Fundição	32
2.2.2	Geração de Areia Usada de Fundição	33
2.2.3	Areia Fenólica Usada de Fundição	35
2.2.4	Areia Verde Usada de Fundição	35
2.2.5	Reciclagem das Areias de Fundição	36
2.2.6	Areia Usada de Fundição como Matéria-prima para a Construção Civil	37
2.3	BLOCO DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO	40
2.3.1	Materiais Constituintes	42
2.3.2	Forma e Textura das Partículas	46
2.3.3	Empacotamento	46
2.3.4	Método de dosagem de concreto para blocos	47
2.3.5	Equipamentos	48
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>50</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	51
3.1.1	Cimento Portland	51
3.1.2	Agregados Miúdos	52
3.1.3	Agregado Graúdo	53
3.1.4	Água	54
3.1.5	Aditivo	54
3.2	METODOLOGIA	54
3.2.1	Coleta das Amostras	55
3.2.2	Peneiramento das Areias Usadas de Fundição	56
3.2.3	Caracterização dos Resíduos e Agregados	56
3.2.4	Empacotamento	59
3.2.5	Método de Produção dos Blocos	60
3.3	PROPRIEDADES AVALIADAS NOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO	66
3.3.1	Resistência Mecânica à Compressão	67
3.3.2	Absorção de Água	69
3.3.3	Índice de Vazios	71
3.3.4	Resistência ao Desgaste por Abrasão	71
3.3.5	Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	72
3.3.6	Avaliação Ambiental	72
3.3.7	Avaliação Econômica	73
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>74</b>
4.1	RESULTADO DAS CARACTERIZAÇÕES DOS RESÍDUOS E AGREGADOS	74
4.1.1	Caracterização Física	74
4.1.2	Caracterização Química	85
4.1.3	Caracterização Estrutural	87
4.2	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO	92
4.2.1	Resistência Mecânica à Compressão	92
4.2.2	Resistência ao Desgaste por Abrasão	101
4.2.3	Absorção de Água	103
4.2.4	Índice de Vazios	105

4.2.5	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para os blocos de concreto</i> .....	107
4.2.6	<i>Avaliação Ambiental dos Blocos de Concreto</i> .....	111
4.2.7	<i>Avaliação Econômica</i> .....	113
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>115</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS</b> .....	<b>119</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE</b> .....	<b>130</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre perigo e causa da extração de areia. ....	21
Tabela 2 - Caracterização química e física do cimento. ....	51
Tabela 3 - Traços produzidos com substituição do agregado miúdo AN pela combinação dos resíduos. ....	61
Tabela 4 - Consumo de cimento por m <sup>3</sup> de cada traço produzido. ....	64
Tabela 5 - Relação água/cimento para os diferentes traços produzidos. ....	65
Tabela 6 - Fator "p" para blocos de concreto para pavimentação. ....	68
Tabela 7 - Teor de umidade dos resíduos e agregados. ....	75
Tabela 8 - Massa específica e massa unitária dos agregados miúdos e dos resíduos. ....	75
Tabela 9 - Massa necessária de AN e da combinação da AFUF e AVUF para produzir 1m <sup>2</sup> de blocos de concreto tipo Unistein 8. ....	76
Tabela 10 - Distribuição granulométrica da areia natural (AN). ....	77
Tabela 11 - Distribuição granulométrica da areia fenólica usada de fundição (AFUF). ....	78
Tabela 12 - Distribuição granulométrica da areia verde usada de fundição (AVUF). ....	79
Tabela 13 - Distribuição granulométrica da combinação da AFUF e AVUF. ....	80
Tabela 14 - Distribuição granulométrica da AI. ....	83
Tabela 15 - Distribuição granulométrica da B-0. ....	84
Tabela 16 - Resultado de perda ao fogo dos resíduos e agregados. ....	85
Tabela 17 - Resultado qualitativo da fluorescência de Raios-X da AFUF e AVUF. ....	86
Tabela 18 - Resultado quantitativo da fluorescência de Raios-X da AFUF e AVUF. ....	87
Tabela 19 - Resistência mecânica à compressão média ( $f_{c_m}$ ) em MPa dos blocos de concreto para pavimentação nos traços referência e com substituição parcial da AN pela AFUF/AVUF. ....	92
Tabela 20 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação a resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias. ....	96
Tabela 21 - Índice médio de desgaste por abrasão dos blocos de concreto para pavimentação. ....	102
Tabela 22 - Absorção de água aos 28 dias de idade dos blocos de concreto para pavimentação com traço referência e com substituição parcial da AN pela AFUF/AVUF. ....	103
Tabela 23 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação ao ensaio de absorção de água. ....	104
Tabela 24 - Índice de vazios nos blocos de concreto para pavimentação nos traços referência e com percentual de substituição da AN pela AFUF/AVUF. ....	106
Os resultados do ensaio para o índice de vazios foram analisados através da análise de variância (ANOVA) do efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas e das interações entre elas é apresentado na Tabela 25. Tabela 25 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação ao ensaio do índice de vazios. ....	107
Tabela 26 - Composição química do resíduo de fundição. ....	111
Tabela 27 - Resultado do ensaio de lixiviação conforme NBR 10005 (2004)) para os blocos de concreto para pavimentação. ....	112
Tabela 28 - Resultado do ensaio de solubilização (NBR 10006) para os blocos de concreto para pavimentação aos 28 dias de cura. ....	112
Tabela 29 - Empacotamento entre a AVUF e a AVUF. ....	131
Tabela 30 - Resistência à compressão aos 7 dias de cura. ....	132





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Degradação ambiental gerada pela extração de areia no Rio Jacuí (RS).....	23
Figura 2 - Caixas para moldagem de peças em ligas fundidas.....	31
Figura 3 - Vibro-prensa utilizados na produção dos blocos de concreto para pavimentação. .	48
Figura 4 - Esteira de carregamento de agregados.....	49
Figura 5 - Fluxograma de caracterização da AFUF e AVUF.....	55
Figura 6 - Coleta da AVUF (a) e AFUF direto do destorroador (b) na empresa geradora.....	56
Figura 7 - Preparação dos resíduos de fundição (a) e o agregado AI (b) para o ensaio de massa específica. ....	57
Figura 8 - Co-produto formado pelo empacotamento dos resíduos de fundição AFUV e AVUF. ....	60
Figura 9 - Desmoldagem dos blocos de concreto após a vibro-prensagem.....	62
Figura 10 - Blocos de concreto para pavimentação produzidos com 25% de substituição da AN pela combinação da AFUF e AVUF.....	65
Figura 11 - Blocos armazenados no primeiro dia de cura. ....	66
Figura 12 - Fluxograma de avaliação dos blocos de concretos produzidos .....	67
Figura 13 - Capeamento dos blocos para ensaio de resistência à compressão.....	68
Figura 14 - Ensaio de rompimento dos blocos para medir a resistência mecânica à compressão. ....	69
Figura 15 - Granulometria do agregado miúdo – areia natural (AN).....	77
Figura 16 - Granulometria da areia fenólica usada de fundição (AFUF).....	78
Figura 17 - Granulometria da areia verde usada de fundição (AVUF). ....	79
Figura 18 - Granulometria da combinação entre a AFUF e a AVUF.....	81
Figura 19 - Comparativo entre a granulometria da combinação entre a AFUF e a AVUF x AN. ....	82
Figura 20 - Granulometria da areia industrial (AI).....	83
Figura 21 - Curva granulométrica da B-0.....	84
Figura 22 - Difratoograma da amostra de AFUF .....	88
Figura 23 - Difratoograma da amostra de AVUF.....	88
Figura 24 – Micrografia da AFUF (aumentado em 50x).....	89
Figura 25 - Micrografia da AVUF (aumentado em 50x).....	90
Figura 26 - Micrografia da AN (aumentado em 50x).....	91
Figura 27 - Classificação morfológica da areia natural.....	91
Figura 28 - Média da resistência mecânica à compressão dos blocos aos 7 e 28 dias de cura.	93
Figura 29 - Efeito isolado da variável “TR” no comportamento da resistência à compressão.	97
Figura 30 - Efeito isolado da variável “RES” no comportamento da resistência à compressão. ....	97
Figura 31 - Efeito isolado da variável idade de cura no comportamento da resistência à compressão. ....	98
Figura 32 – Efeito da interação das variáveis “TR” e “RES” no comportamento da resistência à compressão.....	99
Figura 33 – Efeito da interação das variáveis “TR” e “IDD” no comportamento da resistência à compressão.....	100
Figura 34 – Efeito da interação das variáveis “TR” “RES” e “IDD” no comportamento da resistência à compressão.....	100
Figura 35 - Índice de desgaste a abrasão dos blocos de concreto para pavimentação. ....	102
Figura 36 - Absorção de água dos blocos de concreto para pavimentação. ....	104

Figura 37 - Efeito isolado da variável teor de resíduo no comportamento da absorção de água. .....	105
Figura 38 - Índice de vazios dos blocos de concreto para pavimentação. ....	106
Figura 39 – Micrografia do bloco c/ TREF2 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b) (aumentado 90x). ....	107
Figura 40 - Micrografia do bloco c/ TS2 nas posições vertical (a) e horizontal (b) (aumentado 90x). ....	108
Figura 41 - Micrografia do bloco c/ TS5 nas posições vertical (a) e horizontal (b) (aumentado 90x). ....	108
Figura 42 - Micrografia do bloco c/ TREF3 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b) (aumentado 90x). ....	109
Figura 43 - Micrografia do bloco c/ TS3 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b) (aumentado 90x). ....	110
Figura 44 - Micrografia do bloco c/ TS6 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b) (aumentado 90x). ....	110

## RESUMO

MOOSHER, L. Utilização de resíduos sólidos de fundição como matérias-primas para fabricação de blocos de concreto para pavimentação. São Leopoldo, 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2013.

A geração de resíduos sólidos nos centros urbanos esta relacionada principalmente com o aumento da população e com a intensificação dos processos de industrialização. O gerenciamento desde sua origem, produção, processamento, destino final e reciclagem desses resíduos é atualmente um dos maiores desafios de empresas geradoras, de instituições de pesquisa, órgãos governamentais e empresas afins que buscam uma solução para minimizar ou até eliminar a geração de resíduos ou a sua reciclagem e posterior uso em diversas áreas da indústria, ou até transformando-os em produtos de interesse comercial. Neste sentido, os resíduos de fundição gerados durante a produção de ligas fundidas vêm sendo estudado para seu uso como co-produto em diferentes segmentos industriais, tais como a própria fundição e o da construção civil. Este trabalho objetiva avaliar a viabilidade de aplicação de dois diferentes resíduos, as areias fenólica e verde usadas de fundição, como matéria-prima com valor agregado, esta sendo usada na fabricação de blocos de concreto para pavimentação, avaliando sua transformação para co-produto. Alguns estudos já demonstraram o potencial de aplicação desses resíduos de diversas formas e em diferentes setores da indústria. A aplicabilidade específica desses resíduos dependerá das suas caracterizações, seja ambiental, química, física ou de fases, sendo essa uma etapa fundamental para avaliar a viabilidade de reciclagem e econômica. Desta forma a caracterização destes resíduos configurou-se na etapa essencial do trabalho para depois destiná-los a uma melhor aplicação tecnológica. Foram produzidos blocos com 0%, 25% e 50% de substituição parcial da areia natural pelo co-produto. Esses blocos foram ensaiados quanto a resistência mecânica à compressão aos 7 e 28 dias de cura, absorção de água, resistência ao desgaste por abrasão, índice de porosidade, MEV, avaliação ambiental e viabilidade financeira dos blocos gerados com o uso dos resíduos de fundição. O traço com ter de substituição de 25% da combinação dos resíduos foi o que apresentou os melhores resultados, tanto na resistência à compressão quanto a resistência ao desgaste à abrasão. Os blocos com uso da combinação dos dois resíduos foram classificados ambientalmente como Classe II A – Não Inerte e apresentaram menor custo na produção de blocos de concreto para pavimentação.

Palavras-chave: resíduos de fundição; combinação de resíduos; blocos de concreto; co-produto.



## **ABSTRACT**

MOOSHER, L. Use of foundry waste as raw materials for making concrete blocks for paving. São Leopoldo, 2013. 143 sheets. Thesis (Master Degree in Civil Engineering) – Pos graduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo, 2013.

The generation of solid waste in urban centers is related mainly to the increase in population and the intensification of the processes of industrialization. The management since its origin, production, processing, recycling and final destination of such waste is currently one of the biggest challenges of generating companies, research institutions, government agencies and companies alike who seek a solution to minimize or even eliminate the generation of waste or recycling and subsequent use in various fields of industry, or even turning them into products of commercial interest. In this sense, the foundry waste generated during the production of cast alloys have been studied for use as a by-product in different industries, such as own foundry and construction. This study evaluates the feasibility of applying two different residues of foundry, spent phenolic sand and spent green sand as raw material with value added, this being used in the manufacture of concrete block paving, evaluating its transformation to co-product. Some studies have demonstrated the potential application of the wastes in various forms and in different industry sectors. The specific applicability of these residues depend on their characterizations, whether environmental, chemical, physical or phases, this being a fundamental step to assess the feasibility of recycling and economic. Thus the characterization of this waste was configured in the key step of the work and then consign them to a better technological application. Blocks were made with 0%, 25% and 50% replacement of natural sand per by-product. These blocks were analysed for compressive strength at 7 and 28 days of curing, water absorption, abrasion strength, porosity index, SEM, environmental assessment and financial feasibility of the blocks generated with the use of the by-product. The mark with having to replace 25% of combination of two foundry waste showed the best results in both compression strength as the abrasion strength. Blocks using the combination of foundry waste were environmentally classified as Class II A - Not Inert and had lower costs in producing concrete block paving.

Key words: foundry waste, combination of wastes; concrete blocks; by-product.



## 1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos nos centros urbanos está relacionada principalmente com o aumento da população e com a intensificação dos processos de industrialização. O gerenciamento desde a origem, produção, processamento, destino final e reciclagem de resíduos é atualmente um dos maiores desafios de empresas geradoras, de instituições de pesquisa, órgãos governamentais e empresas afins que buscam uma solução para minimizar, ou até eliminar a geração de resíduos ou ainda buscar a sua reciclagem e posterior uso em diversas áreas da indústria, transformando-os em produtos de interesse comercial.

Os avanços científicos e tecnológicos aceleraram o desenvolvimento industrial, contribuindo com melhorias na qualidade de vida. Porém, esse desenvolvimento está trazendo grandes problemas ambientais através da exploração e transformação de bens naturais não-renováveis, como a extração de areias de rios, a poluição com a queima de combustíveis e de um grande número de resíduos gerados, como por exemplo as areias usadas de fundição.

Os resíduos sólidos industriais podem apresentar um alto grau de periculosidade, tanto para o meio ambiente quanto às pessoas, de acordo com suas propriedades químicas, físicas ou infecto-contagiosas. De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), as características que conferem periculosidade aos resíduos sólidos são toxicidade, patogenicidade, corrosividade, inflamabilidade e reatividade.

A tendência do aproveitamento integral destes resíduos é uma necessidade cada vez maior, devido ao escasseamento dos recursos naturais não renováveis e a preservação do meio ambiente, aliado à crise energética mundial e à busca de fontes alternativas de energia renovável, visando a preservação do meio ambiente e assim evitando qualquer tipo de contaminação.

Exemplos de aproveitamento de resíduos, tais como as areias de fundição incluem, entre outras aplicações geotécnicas (aterros, coberturas de aterros sanitários e barreiras hidráulicas), aplicações rodoviárias (reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos flexíveis ou rígidos), bloco para pavimento de ruas, etc. (LAWRENCE e MAVROULIDOU, 2009).

A extração de areia ocorre muitas vezes em locais que são ambientalmente sensíveis e importantes para a preservação da biodiversidade, dos recursos hídricos, da paisagem ou de demais recursos naturais com função ambiental de grande importância. Na

maioria dos casos, a atividade de mineração implica supressão de vegetação ou impedimento de sua regeneração e em muitas situações, o solo superficial de maior fertilidade é também removido, fazendo com que os solos remanescentes fiquem expostos aos processos erosivos que podem acarretar em assoreamento dos corpos d'água do entorno (MECHI e SANCHES, 2010).

A fiscalização na extração de areia de rio fez com que a Justiça Federal proibisse a mineração no Rio Jacuí, no RS, pois entendeu que havia irregularidades na extração no local. Essa decisão obrigou três empresas que são responsáveis por 95% da mineração deste rio a pararem suas atividades, o que levou a falta de areia em obras de grande importância para Porto Alegre (G1, 2013a). Segundo a Fundação de Proteção Ambiental (Fepam), as escavações irregulares das mineradoras ultrapassaram um metro de profundidade e de acordo com as estimativas da fundação, a área de mineração deve levar 10 anos para se recuperar (G1, 2013b). Todos esses acontecimentos trazem um cenário crítico à população, pois se vê a severa degradação do meio ambiente por empresas que visam somente o lucro, sem dar a devida importância às questões ambientais e ainda se tem atraso em obras públicas, causando sérios transtornos, principalmente de mobilidade para quem é obrigado a passar por essas regiões.

A tabela Tabela 1 Tabela 1 mostra a relação entre o perigo e causa do processo de extração de areia, de acordo com Oliveira et al. (2011).



**Tabela 1 - Relação entre perigo e causa da extração de areia.**

<b>Perigo</b>	<b>Causa</b>
Vazamento de diesel no rio	Inexistência de manutenção da draga, transporte inadequado de combustível, negligência no manuseio.
Vazamento de diesel e lubrificantes na margem	Inexistência de manutenção de máquinas e caminhões, depósito inadequado, descarte de tonéis com resíduos.
Explosão e incêndio	Armazenamento de combustíveis de forma inadequada, deposição inadequada de materiais.
Contaminação do solo	Vazamento de diesel e lubrificantes na margem.
Contaminação do rio	Vazamento de diesel e lubrificantes no rio.
Erosão das margens	Extração próxima à margem, subida e descida de dragas para manutenção, manuseio da tubulação de bombeamento.
Aumento da turbidez e formação de bancos de areia	Extração próxima às margens, falta de caixa de decantação, destruição de mata ciliar.
Destruição de mata ciliar	Estradas de acesso, deposição de material e cilos nas margens.
Percepção ambiental	Impacto visual, poluição do ar, ruídos.
Destruição de bentos	Revolvimento do fundo.

Fonte: Adaptado de Oliveira et al (2011).

Com o uso de resíduos como matérias-primas, diminui-se a procura e paralelamente a exploração dos recursos naturais. O Brasil produziu no ano de 2011 cerca de 65 milhões de toneladas de cimento (SNIC, 2012) e 347 milhões de toneladas de areia para construção civil (SUMÁRIO MINERAL, 2012) e em uma projeção para o ano 2030, prevê-se que o consumo de areia atinja 524 milhões de toneladas no “cenário frágil”, 827 milhões de toneladas no “cenário vigoroso” e 1.276 milhões de toneladas no “cenário inovador”, de acordo com critérios do RT 01 de Calaes (MME, 2009). Parte desse volume poderia estar sendo substituído por diversos resíduos, entre eles as areias usadas de fundição.

Em 2012 o Brasil produziu cerca de 2,86 milhões de toneladas de fundidos (FOUNDRYGATE, 2013), o que gerou em torno de 2,57 milhões de toneladas de resíduos.

Neste sentido, os resíduos sólidos de fundição gerados durante a produção de ligas fundidas vêm sendo estudados para sua transformação em co-produto da empresa geradora visando o emprego como matéria-prima em diferentes segmentos industriais, tais como a própria fundição e a construção civil (METZ et al, 2002; CECCATO, 2003; RESCHKE, 2003; PAGNUSSAT, 2004; BITTENCOURT, 2006; SCOTT HOOD, 2006; WATANABE et al, 2006; PABLOS, 2008; PABLOS et al, 2011). Os resíduos sólidos de fundição são gerados

em grande quantidade, cerca de 90% do volume de fundidos produzidos (SCHEUNEMANN, 2005), sendo assim, torna-se prioritário que se estude alternativas de reciclagem do mesmo, em vez de dispô-los em aterros industriais.

Areia de fundição pode ser utilizada como substituição parcial de cimento ou como uma substituição parcial ou total de agregados finos e como adição suplementar para atingir diferentes propriedades do concreto (BHIMANI et al, 2013).

A reciclagem de resíduos sólidos é uma prática que deve ser incorporada como a próxima etapa após a aplicação de ações de minimização da sua geração e ou regeneração destes resíduos para sua reciclagem interna.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Como comentado anteriormente, os avanços científicos e tecnológicos ao mesmo tempo que aceleram o desenvolvimento industrial contribuindo com melhorias na qualidade de vida da população, também podem trazer fortes impactos ambientais. Visando minimizar estes impactos, esta pesquisa busca colaborar com uma solução ambientalmente correta para dar fim a uma parcela do grande volume de resíduos gerados nas fundições e ainda diminuir a extração de recursos naturais, utilizando os resíduos como co-produto na construção civil.

O uso de resíduos de fundição em substituição parcial ou total da areia natural ajudará a diminuir a extração desse bem, contribuindo com o meio ambiente. Mechi e Sanches (2010) citam que a mineração provoca a poluição do ar por particulados suspensos pela atividade de lavra, beneficiamento e transporte, ou por gases emitidos da queima de combustível, assim como na extração das areias de rio. Outros impactos ao meio ambiente estão associados a ruídos, sobre pressão acústica e vibrações no solo associados à operação de equipamentos e explosões. Os mesmos autores ainda citam que os impactos anteriormente referidos podem ter efeitos danosos no equilíbrio dos ecossistemas, tais como a redução ou destruição de hábitat, afugentamento da fauna, morte de espécimes da fauna e da flora terrestres e aquáticas, incluindo eventuais espécies em extinção, interrupção de corredores de fluxos gênicos e de movimentação da biota, entre outros. Em relação ao meio antrópico, a mineração pode causar não apenas o desconforto ambiental, mas também impactos à saúde causados pela poluição sonora, do ar, da água e do solo. A desfiguração da paisagem é outro aspecto gerado pela mineração. A Figura 1 mostra um exemplo de dano ambiental causado pela mineração.



**Figura 1 - Degradação ambiental gerada pela extração de areia no Rio Jacuí (RS).**

Fonte - G1 (2013a)

Visto que o uso de areia natural na construção civil pode acarretar em sérios danos ao meio ambiente, uma alternativa seria o uso de co-produtos, que podem ser definidos como os produtos de um processo de produção conjunta, gerados compulsoriamente a partir da produção do produto principal e, geralmente, são inerentes ao processo produtivo (MORAES, 2011). Um exemplo de possível co-produto pode ser areia residual oriunda de moldes e machos que em um processo normal, seria descartada após o processo de fundição, tornando-se um resíduo disposto em aterro industrial ou até mesmo em áreas não controladas com grande potencial de contaminação ambiental.

Também é possível definir co-produto como material de processos industriais que apresenta aplicação técnica e economicamente viável por meio de reciclagem. Essa definição é a grande diferença entre co-produto e resíduo. Esses resíduos são gerados por diferentes meios, como nos processos de extração de recursos naturais, transformação, fabricação ou consumo de produtos e serviços e, muitas vezes, passam a ser descartados e acumulados no meio ambiente causando não somente problemas de poluição, como caracterizando um desperdício da matéria-prima originalmente utilizada. Alguns resíduos sólidos industriais podem apresentar um alto grau de periculosidade, tanto para o meio ambiente quanto às pessoas, como é o caso da areia fenólica usada de fundição que é classificada pela ABNT NBR 10004:2004 como Resíduo Classe I- Perigoso, devido à presença de formaldeído e fenol que conferem periculosidade ao resíduo. O setor da construção civil, apesar de ser um grande gerador de resíduos, é ao mesmo tempo um dos setores onde se tem inúmeros estudos para

reaproveitamento de resíduos de diversos segmentos. O volume de subprodutos industriais, com ou sem propriedades pozolânicas que é gerado atualmente, é muito superior à demanda na reciclagem. Portanto, é de grande importância o estudo da substituição de parte do cimento, da argamassa ou do concreto, por resíduos com propriedades pozolânicas ou de preenchimento (SANTOS, 2008). É na construção civil que se abre um mercado potencial para a utilização de co-produtos de outras indústrias como parte da matéria-prima, podendo substituir insumos oriundos de recursos naturais não renováveis, como por exemplo a substituição da areia natural de rio por areia usada de fundição (BITTENCOURT, 2006), escória granulada de fundição em substituição ao cimento no concreto (CECCATO, 2003) e (PAGNUSSAT, 2004) utilizando em blocos de concreto para pavimentação, substituição do cimento por resíduos de galvanoplastia na produção de blocos de concreto para pavimentação (FRANCO, 2011), entre tantos outros.

A indústria de fundição é responsável por descartar cerca de 2 milhões de toneladas por ano de areias de fundição (DAL MAGRO, et al 2010), além de outros resíduos em menor volume, como areia de varrição, escória, etc. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos para avaliar o comportamento destes materiais isoladamente no concreto. O presente trabalho propõe o uso combinado de dois destes materiais excedentes do processo de fundição no sentido de avaliar a seguinte hipótese técnica:

- O uso combinado de areia verde usada de fundição (AVUF) e areia fenólica usada de fundição (AFUF) substituindo parcialmente a areia produz agregado com composição granulométrica e resistência mecânica adequada ao emprego em concreto para blocos de pavimentação;
- A bentonita presente na AVUF contribui para o encapsulamento da AFUF em matriz de cimento Portland.

Sendo assim, esta pesquisa tem como base a utilização dos resíduos AFUF e AVUF como co-produto na construção civil. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Pablos et al (2011) que utilizou areia de fundição com argila e escória de fundição para fabricação de blocos de concreto e obteve bons resultados com resistência à compressão ultrapassando os 50 MPa. Assim, este trabalho visou obter resultados técnicos e ambientais satisfatórios, o qual poderá trazer redução do impacto ambiental com a transformação de dois resíduos de fundição em um único co-produto, uma vez que esses resíduos são dispostos em aterros industriais podendo até mesmo contaminar o solo, assim como no próprio pátio das

fundições quando dispostos irregularmente. Assim, serão preservados os recursos naturais não renováveis, reduzindo a extração de areia natural de rios, diminuindo também o custo com matéria-prima, neste caso, já que a empresa geradora dos resíduos tem interesse em fabricar blocos de concreto para pavimentação com o co-produto gerado em seu processo de fabricação de ligas fundidas.

Este trabalho difere-se de muitas outras pesquisas, pois está inovando ao transformar dois resíduos em um único co-produto para ser substituto da areia natural em blocos de concreto para pavimentação e principalmente por oferecer uma alternativa a areia de rio, onde sua extração vem crescendo exponencialmente nos últimos anos. O Brasil produziu 325 milhões de toneladas de areia para a construção civil em 2010 e 347 milhões de toneladas em 2011, representando um crescimento de 6,7% (SUMÁRIO MINERAL, 2012), acompanhando a intensa demanda pelo material, que aumentou devido a continuidade do Programa de Aceleração do Crescimento, o PAC 2, que envolve R\$ 1,55 trilhão de recursos, distribuídos em sua maior parte para o período 2011-2014, sendo uma fatia desses investimentos destinados a vários setores da construção civil e às obras da Copa do Mundo de 2014 (SUMÁRIO MINERAL, 2011).

A extração dessa areia, na maioria das vezes é ilegal, destrói as margens dos rios, prejudica a pesca, a vegetação e a população ribeirinha. De acordo com a superintendência do Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) no Rio Grande do Sul, em 2010 foram extraídas 3,6 milhões de toneladas de areia do rio Jacuí. Em 2011, o volume subiu para 7,1 milhões de toneladas, representando praticamente a metade da produção de areia em todo o estado nesse ano que foi de 14,3 milhões de toneladas, lembrando que esse volume foi extraído apenas do rio Jacuí (OLIVEIRA, 2013). Toda essa exploração dos rios leva a uma perda da qualidade da água, perda na biodiversidade que habita as margens dos rios e ainda alteração da própria paisagem dos rios, aponta o biólogo Jackson Muller, (entrevista dada ao RBS Notícias, na edição do dia 14/01/2013).

A utilização das areias usadas de fundição como matéria-prima na construção civil, além de ajudar a evitar a extração e a exploração dos nossos rios, sejam elas legais ou não, ajudaria a diminuir a área dos aterros industriais onde são dispostos os resíduos de fundição.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o emprego de um composto formado pelas areias usadas verde e fenólica geradas nas fundições, em substituição parcial do agregado miúdo natural na fabricação comercial de blocos de concreto para pavimentação, reproduzindo a metodologia comercial.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos são:

Avaliar as propriedades física, química, térmica e estruturais dos resíduos de fundição para emprego como agregado miúdo para concreto;

Avaliar as características tecnológicas da composição dos resíduos de fundição tendo em vista critérios das normas de agregados para concreto;

Determinar a influência de diferentes proporções de substituição do agregado natural pelo co-produto em relação a resistência mecânica à compressão, desgaste superficial, absorção de água e índice de vazios dos blocos de concreto para pavimentação;

Analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental dos blocos de pavimentação produzidos industrialmente com os resíduos de fundição.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação foi desenvolvida em cinco capítulos. O primeiro capítulo abrange a introdução e a justificativa, demonstrando a problemática do estudo e sua relevância, seguido do objetivo geral e dos objetivos específicos a serem alcançados no estudo.

O segundo capítulo contempla a revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes ao tema de pesquisa, com enfoque em resíduos de fundição e blocos de concreto para pavimentação produzidos com substituição parcial do agregado natural por matéria-prima alternativa.

O capítulo três contempla o programa experimental desta pesquisa, assim como os materiais e métodos utilizados e as propriedades a serem avaliadas nos blocos de concreto produzidos.

Os resultados, as análises e discussões desses resultados são apresentados no capítulo 4.

Para finalizar, o quinto capítulo demonstra as conclusões da pesquisa, respondendo aos objetivos específicos do estudo.

#### **1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Vários são os fatores passíveis de interferência no desempenho do concreto, como o tipo de cimento, a relação água aglomerante (a/agl), os agregados, os equipamentos utilizados, a metodologia, etc. Por isso, foram estabelecidas as delimitações para o desenvolvimento do trabalho, destacando-se:

Tipo de cimento: como o objetivo geral da pesquisa é avaliar o emprego da combinação de dois resíduos sólidos de fundição em substituição parcial do agregado miúdo natural na fabricação de blocos de concreto para pavimentação, optou-se por trabalhar com apenas um tipo de cimento, o CPV-ARI RS.

O mesmo critério foi adotado para os agregados, onde foram produzidos os blocos desta dissertação com os mesmos agregados utilizados pela empresa parceira nesta pesquisa, assim como foi utilizado seu traço como referência, bem como os parâmetros da vibro-prensa utilizada para moldar os blocos.

Percentuais de substituição da areia natural pela combinação da AFUF e AVUF: pelo fato de atraso no cronograma do projeto, foram empregados apenas dois percentuais de substituição da areia natural pelos resíduos, 25% e 50%, e se embasam em outros estudos similares, como por exemplo, os estudos realizados por Pagnussat (2004) e Scott Hood (2006).

Tipo de resíduo de fundição: os resíduos de fundição utilizados para o estudo são proveniente dos processos de produção de ligas fundidas, em moldes e machos que são as AFUV e AVUF. Inicialmente, fazia parte do projeto o uso de escória de fundição juntamente com as areias usadas, com intuito de melhorar a composição granulométrica, porém, ao destorroar e triturar a escória, houve algum tipo de imantação dos grãos de areia junto com o metal presente na escória, o que impossibilitou a separação magnética com os recursos que se dispunha no momento.

Muitos trabalhos consultados não indicam qual a origem e caracterização real da areia de fundição utilizada nos respectivos trabalhos, se era areia verde, areia fenólica ou outros tipos, apresentando genericamente apenas “areia de fundição” (ADF ou AF).



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nos últimos anos as pesquisas sobre reciclagem externa de resíduos nos setores metal/mecânico e siderúrgico, voltaram-se principalmente para a incorporação em cimento e concreto (como agregado miúdo e/ou graúdo) e também em material cerâmico. Percebe-se também que existe uma tendência mundial nas últimas décadas de reciclagem de resíduos em associação, que é a utilização de mais de um resíduo, transformando-os em uma única matéria-prima. Essa tendência ocorria geralmente em materiais cerâmicos devido a sua alta capacidade de incorporação de outros materiais, mas atualmente também existem estudos com foco no uso em cimentos e concretos.

A revisão bibliográfica deste trabalho aborda os temas resíduos sólidos, fundição, areias de fundição, bem como sua fonte geradora, a indústria de fundição e bloco de concreto para pavimentação e procura mostrar alternativas para que seus resíduos possam ser transformados em um co-produto com valor comercial para uso na construção civil, neste trabalho visando sua utilização na fabricação de blocos de concreto para pavimentação.

### **2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS (PROBLEMÁTICA)**

Conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduos sólidos são todos os resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Os resíduos podem ser classificados em:

- a) Resíduos Classe I – Perigoso;
- b) Resíduos Classe II – Não Perigosos;
  - Classe II A – Não Inertes
  - Classe II B - Inertes

Os resíduos considerados perigosos, Resíduos Classe I, são os que apresentam características de periculosidade, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-

contagiosas, podendo representar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, assim como os que possuem propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Já os Resíduos Classe II – Não Perigosos, são divididos em:

- Classe II A – Não Inertes: São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou resíduos classe II B – Inertes, no termo da NBR 10004 (ABNT, 2004). Os resíduos classe II A – Não Inertes podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Classe II B – Inertes: quaisquer resíduos que quando amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004) e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (ABNT, 2004), não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

No Brasil, a preocupação com resíduos começou a ganhar força na última década, mas ainda hoje é difícil promover grandes mudanças no que diz respeito à diminuição do seu potencial de geração de resíduos sólidos e ao desenvolvimento de tecnologias de tratamento, reciclagem e reaproveitamento.

Haja vista a problemática com os mais diversos tipos de resíduos, foi sancionada em 02 de agosto de 2010 pelo então Presidente da República Luis Inácio Lula da Silva a Lei Nº 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010), tendo como objetivos, entre outros, proteger a saúde pública e a qualidade ambiental, a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como uma gestão integrada desses resíduos. Além disso, a PNRS define responsabilidades e penalizações cabíveis para geradores de resíduos e também incentivos fiscais e tributários para estimular a criação de empresas exclusivamente recicladoras.

Após a PNRS, as empresas geradoras de resíduos passaram a se comprometer mais com a questão ambiental, mais pelo receio de sofrer penalizações ao descumprir a lei do que pela questão ambiental em si. Mas, a partir deste momento, muitas empresas buscaram parcerias com instituições de pesquisa e até mesmo outras empresas para juntas tentar

encontrar medidas que visem reduzir a geração de resíduos e ou medidas para reciclar e reaproveitar os resíduos gerados no próprio processo ou como matéria-prima em outros segmentos da indústria.

## 2.2 FUNDIÇÃO

De acordo com Siegel (1975), os principais métodos de dar forma aos metais são a deformação plástica a quente e a frio, corte a quente e solda, usinagem, metalurgia do pó e fundição. A fundição é definida como um processo metalúrgico que consiste em obter um produto sólido a partir de uma liga metálica no estado líquido, mediante solidificação desta em um molde (Figura 2). Existem muitas técnicas usadas em fundição de metais, sendo que a escolha do processo depende do tamanho, quantidade, complexidade da peça e qualidade superficial desejada para o produto acabado (MATOS, et al. 1997; MARINO, 2003).



**Figura 2 - Caixas para moldagem de peças em ligas fundidas.**

Na fundição, os ferros fundidos formam um grupo de materiais onde é possível obter diversas microestruturas e assim, conferir peças com inúmeras propriedades, como por exemplo, alta resistência ao desgaste por abrasão e elevada resistência à corrosão (MORAES, 2005).

O processo de fundição de metais é muito rápido e variável, oferecendo uma grande velocidade na confecção de peças, desde formas simples até as mais complexas e ainda garantindo boa precisão dimensional. Nesse processo, o que geralmente absorve maior tempo é a confecção dos moldes, que, na maioria das empresas é um trabalho manual ou artesanal. Já as peças fundidas, dependendo das exigências para seu uso, podem sofrer operações complementares de usinagem, tratamento térmico e de superfície (MORAES, 2000).

### **2.2.1 Indústria da Fundição**

A indústria de fundição foi e ainda é de importância relevante para o desenvolvimento industrial de um país. A fabricação dos mais diferentes tipos de máquinas e equipamentos depende da disponibilidade de peças metálicas, produzidas em processo de fundição.

Siegel (1982) destaca que as fundições no Brasil começaram a se desenvolver, primeiramente em São Paulo e depois em Minas Gerais, durante os séculos XVII e XVIII. Esse desenvolvimento se deu em virtude do interesse no ouro, prata e pedras preciosas, unido com o desbravamento dos então Bandeirantes que exploravam o estado de Minas Gerais.

Já na atualidade, a Indústria Brasileira de Fundição compreende cerca de 1.340 unidades fabris, sendo que 48% produz peças em metais ferrosos (ferro e aço) e 52% produz peças em metais não-ferrosos, principalmente em alumínio, que representa aproximadamente 2/3 deste seguimento. No Brasil, 97% das empresas de fundição são controladas por Capital Nacional e 95% são classificáveis como Pequenas ou Médias Empresas (ESTAL/MME, 2009).

O Brasil é tradicionalmente um dos maiores produtores mundiais de peças fundidas, tendo produzido cerca de 3,5 milhões de toneladas no ano de 2011 (ABIFA, 2011). Para tal processamento, foram necessárias milhões de toneladas de areia de moldagem e machos, sendo que parte deste volume é reciclado no processo e a diferença, torna-se um excedente a ser descartado.

A disposição incorreta feita em aterros afeta adversamente o meio ambiente, trazendo prejuízos tanto para a flora e para a fauna quanto para os seres humanos.

Dentre os resíduos de fundição, a areia utilizada na confecção de moldes é o resíduo gerado em maior quantidade de todos os resíduos sólidos, gerando quantidades relevantes. Outros resíduos sólidos importantes inerentes aos processos de fundição são: escória, pós de exaustão da preparação da areia, da desmoldagem, do forno de fusão, da limpeza de peças e da usinagem, lama do tratamento de água de refrigeração e cavaco de usinagem (MORAES, 2002).

Atualmente indústrias de fundição têm buscado alternativas para diminuir a geração de resíduos em seu processo, ou um meio de reciclagem ou uso desses em outros segmentos, além disso, muitas indústrias do setor estão buscando certificações ambientais. Segundo a NBR ISO 14001 (ABNT, 2004), as organizações devem estabelecer e manter

procedimentos para identificar os aspectos ambientais de suas atividades, produtos ou serviços que possam por ela ser controlados e sobre os quais se presume que ela tenha influência, a fim de determinar aqueles que tenham ou possam ter impacto significativo sobre o meio ambiente.

### **2.2.2 Geração de Areia Usada de Fundição**

De acordo com Mariotto (2000), ao mesmo tempo que a indústria de fundição pode contribuir com o meio ambiente ao consumir diversos tipos de sucatas metálicas, ela gera milhares de toneladas de resíduos sólidos não metálicos, além de efluentes gasosos e líquidos.

Dentre os resíduos sólidos gerados pelas empresas de fundição, o que apresenta o maior volume produzido é a areia de fundição, que quando nova é obtida através da mistura de uma areia fina com uma resina fenólica alcalina e é produzida para a fabricação de moldes e machos para peças de ferro fundido.

Segundo Bonin e Rossini (1994) apud Cunha (2005), os resíduos de areia de fundição são na sua maioria decorrentes da areia descartada após a perda da sua condição de trabalho, o que é variável em cada empresa.

As areias utilizadas em fundição são essencialmente compostas por quartzo, originários da decomposição mecânica pela ação atmosférica; suas propriedades são influenciadas pelo tipo de rocha que as originaram, pela forma de processamento da decomposição, pelo transporte e pelas transformações ocorridas após sedimentação (BERNDT, 1989) apud (KLINSKY e FABRI, 2009).

O principal componente da areia de moldagem ou de macharia utilizada nas fundições é um agregado fino, mineralogicamente puro, denominado “areia base” (ABIFA, 1999; MARINO, 2003) com granulometria que varia de 0,05mm a 2mm em seu diâmetro, sendo os tipos mais usados na indústria de fundição a areia de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) que é a mais abundante, a areia de olivina [ $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$ ], de zirconita ( $\text{ZrSiO}_4$ ) e de cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_5$ ) ou ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) (WEDDINGTON et al, 1991; FERNANDES, 2001; RAMPAZZO et al, 1989; MARINO 2003).

A característica dos grãos de areia tem influência relevante no acabamento superficial e na qualidade final do ferro fundido, uma vez que a areia representa a maior parte do material empregado na confecção dos machos e moldes. A maioria das areias de fundição são areias aglomeradas, onde o aglomerante mais comum é a argila mineral, que pode ser

definida como uma rocha, geralmente plástica, constituída essencialmente por silicatos de alumínio hidratados, denominados argilo-minerais (D'ELBOUX, 2000 apud MACIEL, 2005).

Após o vazamento do metal e a desmoldagem, restam os resíduos do molde e dos machos que são compostos na sua maior parte de areia com aditivos e aglomerantes, inclusive resíduos de metal, canais, granalha, etc. Para a confecção desses moldes e machos é utilizada uma grande quantidade de areia, sendo que esse consumo pode variar entre 800 kg e 1000 kg de areia para cada 1000 kg de peças produzidas, valores que dependem do tipo de peça (CETESB, 2002). Por ano esse volume alcança milhares de toneladas de areia extraída de jazidas próximas aos litorais.

Algumas alternativas podem ajudar a reduzir a quantidade de resíduo de fundição a ser descartado, segundo Diehl (1996), e que atualmente são bastante utilizadas:

- Reaproveitamento interno da areia usada sem tratamento e sem geração de resíduo na diluição do processo de moldagem;
- Reciclagem da areia usada via tratamento de regeneração,
- Reaproveitamento externo, como matéria-prima em outros segmentos da indústria, como por exemplo: blocos de concreto, tijolos cerâmicos, massa asfálticas, etc.

A utilização de resíduos como matéria-prima requer uma série de ensaios, inclusive de caráter ambiental, onde deve ser avaliada a classificação desses resíduos de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Pablos et. al (2011) utilizaram em seu trabalho areias de fundição aglomeradas com argila e escória de alto forno que apresentaram uma caracterização que as classificaram como Resíduo Classe II A – Não Inerte, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), assim como Panazzolo (2007), que utilizou em seu trabalho areia verde usada de fundição e da mesma forma, encontrou igual classificação para o resíduo de fundição.

As características físicas e químicas da areia de fundição vão depender em grande parte do tipo de processo de fundição e do setor industrial a partir do qual se origina. Na fundição moderna, a areia normalmente é reciclada e reutilizada por muitos ciclos de produção (BHIMANI, 2013).

A areia verde produzida para fundição é formada basicamente pela areia base (natural), bentonita e pó de carvão. A areia base é constituída essencialmente de sílica (óxido de silício –  $\text{SiO}_2$ ). Já a bentonita é um silicato de alumina hidratado que contém em sua

composição silício, ferro, cálcio, alumínio, magnésio, sódio e potássio. O pó de carvão é composto basicamente por carbono, cinzas, enxofre, água e material volátil (CARNIN et al, 2010).

### **2.2.3 Areia Fenólica Usada de Fundição**

A areia fenólica usada de fundição (AFUF) é resultado dos resíduos gerados no processo de produção de ligas fundidas, o qual usa moldes fabricados pelo processo de moldagem com areia fenólica para fundição. Essa areia, que confere aos moldes as características de resistências à tração e à compressão, é composta basicamente por areia nova, areia de retorno do próprio processo e aditivos orgânicos e minerais, tendo sua granulometria geralmente mais fina que a areia natural (AN).

Conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), a areia de fundição é classificada como Classe II A – Não Inerte, porém não especifica o tipo de areia. Já a areia fenólico-alcálica é classificada como resíduo Classe I - Perigoso, pois contém a substância fenol. Apesar de seu potencial contaminante, sabe-se que, não raro, as areias fenólico-alcálicas geradas nos processos de fundição são armazenadas no pátio da própria indústria de fundição, podendo gerar um grave problema ambiental. Visando diminuir os impactos ambientais e econômicos gerados pela destinação do resíduo, diversas pesquisas vêm sendo dirigidas atualmente avaliando a incorporação parcial ou total em outros materiais das areias usadas de fundição, principalmente a areia fenólico-alcálica (CALHEIRO et al, 2010).

### **2.2.4 Areia Verde Usada de Fundição**

Assim como a areia fenólica, a areia verde usada de fundição (AVUF) também é resultado dos resíduos gerados no processo de produção de ligas fundidas. Esta areia é utilizada no processo de confecção de moldes e machos para fabricação de peças fundidas. Para a moldagem em areia verde, a argila é o ligante mais usual para dar forma às superfícies externas do produto fundido (KLINSKY e FABBRI, 2009). Além da argila, basicamente compõem ainda a areia verde água e aditivos (pós de carvão e, mogul ou amido de milho) (MORAES e VILELA, 2001).

De acordo com Zanetti e Fiore (2002), a palavra “verde”, designada ao produto areia verde, denota da presença de uma mistura de moldagem que não é submetida a nenhum tipo de aquecimento ou de resfriamento e nem mesmo a um processo de cura que utilize gases.

A areia verde usada de fundição é geralmente o resíduo de maior volume gerado nas fundições. Por esse motivo, as empresas buscam uma solução para reutilização dessa areia, visto que o custo com descarte ou regeneração pode representar um valor alto nos custos das empresas.

A composição química dos resíduos de areia de fundição depende do tipo de metal moldado na fundição e do tipo de ligante usado. Resíduos areias de fundição são compostos principalmente de areia de sílica, revestidos com uma película fina de carbono queimado, ligante residual (bentonita, carvão e resinas) e pó (SIDDIQUE et al, 2007).

### **2.2.5 Reciclagem das Areias de Fundição**

A preocupação com o impacto ambiental dos resíduos sólidos gerados nas unidades fabris brasileiras tem aumentado consideravelmente. Diversas indústrias brasileiras estão adotando sistema de gestão ambiental visando estarem de acordo com as normas vigentes e a certificação ISO 14001, para complementar sua idéia de gestão ambiental. A tendência de gerenciamento ambiental tem evoluído em função da regulamentação mundial estabelecida para as questões de desenvolvimento sustentável, de forma a substituir as alternativas corretivas por medidas preventivas. A diminuição da geração de resíduos e a reciclagem e/ou regeneração dos mesmos resíduos constituem práticas consideradas básicas e necessárias, atingindo objetivos de natureza ambiental e econômica, através da redução de consumo de materiais e economia de taxas de disposição em aterros industriais. Entretanto, o principal agente estimulador é o fator econômico redução de despesas, seja com a compra de matérias-primas e insumos, com gastos para o descarte, o tratamento de resíduos ou transporte.

Os tipos de resíduos gerados e os processos de recuperação, regeneração ou descarte apresentam particularidades. A areia utilizada, em grandes quantidades na confecção dos moldes, destaca-se por ser o resíduo mais gerado numa fundição de moldagem em areia, chegando a um percentual na ordem de 90% em massa de todo resíduo gerado. Diversos métodos de tratamento de areias usadas em fundição têm sido implementados e estudados, como os processos de recuperação (destorroamento, separação magnética, resfriamento e classificação granulométrica, típico em todas as fundições), regeneração química, mecânica a úmido e a seco, térmica e termo-mecânica.

Moosher e Moraes (2010) realizaram um trabalho de regeneração termo-mecânica com areia fenólica Shell Molding e obtiveram, em comparação com a areia base, resultados



satisfatórios, alcançando mais de 90% das características iniciais dessa areia, com a combinação dos processos de regeneração, validando o processo para este tipo de resíduo.

Segundo Diehl (1996), a regenerabilidade das areias usadas pode ser afetada pela estrutura dos seus grãos, pelos diferentes tipos de aditivos utilizados na sua formulação, pelo teor de finos, tipo de regenerador, etc.

Nos últimos anos, muitos trabalhos procuraram alternativas de reciclagem ou reuso dos resíduos de fundição, conforme será visto a seguir

### **2.2.6 Areia Usada de Fundição como Matéria-prima para a Construção Civil**

A areia usada de fundição é atualmente fonte de diversas pesquisas sobre sua aplicação como matéria-prima, principalmente na área de pavimentação, seja em matrizes asfálticas ou em artefatos de concreto. Essa areia pode substituir parcial ou totalmente agregados naturais, como a areia natural de rio na produção de concretos, por exemplo.

De acordo com Sumário Mineral (2006), agregados para construção civil são as denominações de rochas britadas, rochas aplicadas “in natura” e areias, além de substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias, produtos industriais e outros. Os recursos em agregados, em geral, são abundantes no Brasil, principalmente nas regiões sul e sudeste.

Os agregados oriundos de resíduos tendem a ter sua composição granulométrica diferentes dos agregados naturais, tanto miúdo quanto graúdo. O tipo e a granulometria do resíduo podem influenciar consideravelmente a granulometria final dos agregados, como por exemplo, o resíduo de construção (BAZUCO, 1999). Além disso, uma granulometria muito diferente entre os agregados pode prejudicar o empacotamento, proporcionando um alto índice de vazios no concreto, comprometendo assim as propriedades mecânicas.

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas pela norma, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

A indústria da construção civil é uma das atividades que mais usufrui da extração de recursos naturais, onde cerca de 50% dos recursos extraídos são destinados à construção civil. Com isso, ganham força os problemas de escassez de recursos naturais, principalmente com o crescente aumento da fiscalização ambiental (JOHN, 2009), e mais ainda nos últimos anos com o aquecimento do mercado imobiliário, onde o consumo de matérias-primas

multiplicou-se, principalmente nas indústrias de cimentos e agregados. É nesse nicho de mercado que muitas empresas geradoras de resíduos buscam alternativas para destinação, reduzindo os custos com disposição final e evitando agressões ao meio ambiente. Dentre essas empresas, a de fundição é uma das principais onde mais se concentram estudos e parcerias buscando alternativas para o reuso de seus resíduos.

Olenbush (1999) cita a parceria entre fundições americanas e indústrias de reciclagem, produtoras de asfalto, cimenteiras, produtores de artefatos como tijolos e blocos de concreto, dentre outros como exemplos bem sucedidos de interação entre os setores.

Em caráter experimental, Watanabe et al. (2002) avaliaram a utilização da areia de fundição como agregado miúdo para a fabricação de blocos de concreto para pavimentação intertravados, em teores de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%, obtendo resultados considerados satisfatórios. Esses autores observaram que o teor de 25% de substituição foi o que apresentou os melhores resultados quanto à resistência à compressão. Nesse estudo, foi identificado que em percentuais de substituição superiores a 25%, veio a ocorrer problemas de hidratação do cimento devido à presença de bentonita que contaminava o material.

Em um estudo realizado por Aranzabal et al. (1999) apud Ceccatto (2003), os autores testaram a areia de fundição como agregado em misturas asfálticas, na produção de concretos e de cimento, onde obtiveram resultados satisfatórios, muito próximos ao traço referência, encontrando valores que torna possível a utilização da areia de fundição em concretos, em relação às resistências à compressão e à tração e permeabilidade.

Já Bittencourt (2006) relata uma proposta para a reutilização da areia de fundição na construção civil. O projeto apresentou uma alternativa para a utilização de aproximadamente 800 toneladas/mês de areia de fundição descartada por uma empresa local. A partir das análises para a caracterização dos resíduos, o processo de produção foi determinado, com o objetivo de produzir blocos de concreto, substituindo em massa a areia tradicional por areia de fundição. Os resultados obtidos com o processo piloto satisfizeram todos os requisitos estabelecidos, sendo assim, passaram a ser fabricados em grande escala.

Outro trabalho sobre o uso de resíduos de fundição foi o estudo da influência da adição de areia de fundição residual não fenólica em substituição parcial da areia comum na fabricação de pavimentos de concreto e obtiveram um aumento de 27% na resistência à compressão ao substituírem 25% da matéria-prima original pelo resíduo de fundição (WATANABE et al., 2006).

De acordo com o estudo de Siddique e Noumowe (2008) os autores relataram em que a areia de fundição pode ser usada em substituição a areia natural em materiais de baixa resistência, isto é, sem função estrutural, sem nenhuma modificação ou ajuste significativo e que as propriedades de resistência do concreto com as misturas aumentaram conforme se elevou o percentual da areia usada de fundição.

Após algumas pesquisas, Piovesan et al (2008) produziram seus blocos de concreto com uma mistura de areia de cura à frio e areia verde em um percentual de 20% juntamente com 80% da melhor composição granulométrica entre pedrisco e areia natural de granulometria média, onde obtiveram uma resistência à compressão de 36,1 MPa, sendo um bom resultado de acordo com a solicitação de 35 MPa da NBR 9781 (2013).

Outro trabalho com o uso de resíduos industriais foi o de Siddique et al. (2009), que estudaram o efeito do uso de areia usada de fundição como substituto parcial do agregado miúdo na resistência à compressão do concreto, onde foram produzidas misturas com 10%, 20% e 30% de substituição da areia natural e testados aos 28 e 56 dias de cura. Na idade de 28 dias, a resistência à compressão aumentou 4,2, 5,2 e 9,8% nas misturas com 10, 20 e 30% de substituição, comparado ao concreto referência. Já aos 56 dias, a resistência à compressão foi 15, 12, 15, e 20% maior do que a resistência à compressão aos 28 dias para as misturas que continham 0, 10, 20, e 30% de areia de fundição.

Outra forma de uso da areia usada de fundição na construção civil, segundo Alonso-Santurde et al. (2010), é quando essa areia pode ser considerada como um material adequado para a produção de tijolo cru, substituindo parcialmente o teor de argila, devido a grande disponibilidade, ao seu tamanho de partícula e a composição química.

Já Etxeberria et al. (2010) obtiveram em seu estudo uma melhor trabalhabilidade, em torno de 60% maior, do concreto produzido com areia de fundição ligada quimicamente que o concreto convencional e ainda relataram que o concreto produzido com essa areia ou com areia verde pode obter propriedades mecânicas mais adequadas do que o concreto convencional, quando o concreto é produzido com alta relação água-cimento. Os mesmos autores ainda citam que o concreto produzido com a presença de subprodutos da indústria metalúrgica absorvem menor percentual de água por capilaridade e ainda obtém maior resistência à compressão residual após expostos a alta temperatura que o concreto convencional.

De acordo com Pablos et al (2011), os autores comprovaram em seu estudo a viabilidade técnica da utilização dos resíduos sólidos industriais gerados pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila e das escórias de alto-forno como agregado na composição de concretos não estruturais e em particular, na fabricação de peças para pavimentação onde obtiveram resistência mecânica à compressão superior a 50 MPa.

O uso correto (após ser estudado e analisado) de resíduos, tal como a areia de fundição como co-produto em substituição a agregados ou ao cimento na produção de concreto, pode gerar inúmeros benefícios ambientais e benefícios econômicos tanto para as empresas geradoras quanto para as empresas que empregarem os resíduos na sua produção.

### **2.3 BLOCO DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Os blocos de concreto intertravados já foram muito utilizados como material arquitetônico, mas nas últimas décadas passaram a ser largamente utilizados para pavimentação de estradas. O pavimento pode ser descrito como uma estrutura construída sobre a superfície de algum leito, após os serviços de preparação desses, como a terraplanagem, por meio de camadas de vários materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade, cuja principal função é fornecer segurança e conforto ao usuário (SOUZA, 1980; SANTANA, 1993a apud MULLER, 2005).

Dentre os materiais empregados para a pavimentação urbana destacam-se os blocos intertravados de concreto. Esses blocos vêm tendo uma aceitação cada vez maior no Brasil desde a década de 1990 (AMADEI, 2011). Atualmente, a indústria de blocos de concreto intertravados é responsável por grande parte do mercado de pavimentação, com seu uso presente tanto em pequenas cidades quanto nos grandes centros, não só no Brasil, mas no exterior também.

Hoje em dia, um número cada vez maior de cidades dispõem de calçadas, pátios, estacionamentos e áreas externas de condomínios revestidos com blocos de concreto dos mais diversos tamanhos e formatos. Esses blocos também são conhecidos como *pavers* ou pavimentos drenantes, porque são assentados diretamente sobre o solo ou areia e podem assim ajudar a escoar a água de chuva em vez de jogá-la totalmente para os bueiros, galerias e córregos (AMADEI, 2011). Isso, em dias de chuva com grandes volumes, ajuda a evitar alagamentos, porque o solo pode absorver boa parte da água. Outra vantagem desse tipo de pavimento está relacionado com a manutenção de tubulações que passam sob o mesmo, pois

pode-se retirar os blocos, consertar o que for necessário e depois recolocar as mesmas peças, sem envolver grandes necessidades de mão-de-obra especializada (FIORITI et al, 2007).

Os blocos de concreto para pavimentação são vendidos pelas empresas por metro quadrado e são oferecidos em diversos formatos, cores e modulações, com espessuras que vão de 6 cm a 10 cm, de acordo com a aplicação desejada. Para tráfego de pedestres, ciclovias ou ruas internas de condomínios, por exemplo, os blocos devem ter resistência característica a compressão mínima de 35 MPa. Já para uso em vias com tráfego mais intenso e de veículos maiores, são recomendados os blocos de 50 MPa (NBR 9781, ABNT 2013).

Quando o arquiteto ou engenheiro projeta um piso, ele determina qual o tamanho e tipo de bloco mais adequado para utilizar, qual a espessura das camadas de sub-base e sub-leito, visando suportar as cargas que ali passarão para não afundar e não quebrar (MEDEIROS, 2008).

Por muito tempo o pavimento intertravado era utilizado apenas em áreas que demandavam efeitos arquitetônicos ou paisagísticos, mas a partir da década de 1990 tornou-se um material empregado em qualquer tipo de pavimento, inclusive o industrial e rodoviário, tanto esteticamente quanto estruturalmente (CRUZ, 2003).

Os blocos de concreto padrão comercial utilizados na pavimentação são compostos basicamente por cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Para que se tenha o retorno desejado, tanto comercial quanto técnico e ambiental, a produção desses blocos com uso de resíduos deve, sumariamente, atender todos os requisitos técnicos exigidos pelas normas. Assim, será possível se ter um produto ecologicamente correto e de boa qualidade.

Existem dois tipos básicos de concretos, os dito “plásticos” e os “secos”. Frasson Júnior (2000) diferencia estes concretos, onde as características de cada um seriam bastante diversificadas. Os concretos plásticos seriam os concretos convencionais utilizados em obras de concreto armado, concretos fluidos e concreto graute utilizados em obras de alvenaria estrutural. Já os concretos secos são considerados o concreto projetado, o concreto para blocos para alvenaria e para pavimentação, tubos, o concreto compactado a rolo e ainda as lajes alveolares tipo Roth e as estacas protendidas, ambas moldadas por extrusão. A grande diferença entre concretos plásticos e secos está no fato que em concretos plásticos, a pasta de cimento ocupa praticamente todos os espaços vazios entre os agregados, já nos concretos secos, existe a presença significativa de ar na mistura Tango (1994) apud Pagnussat (2004). A

consistência “seca” permite a conformação dos elementos sem necessitar que o concreto esteja curado para retirar a fôrma. Ou seja, quando extrudado ou quando vibro-prensado, ao se retirar a fôrma o concreto permanece com seu formato de conformação. O concreto seco caracteriza-se por ter uma baixa relação água/aglomerante e agregados, grande consistência, alta coesão e pelo modo da retirada do ar aprisionado, através de equipamentos de compactação (AMADEI, 2011).

O concreto utilizado para a produção dos blocos para pavimentação em geral são do tipo “seco”, o que permite sua desmoldagem tão logo finalize o processo na vibro-prensa. Esses blocos, no momento em que estiverem no seu estado endurecido, devem necessariamente apresentar resistência à compressão igual ou superior ao requerida pela NBR 9781 (ABNT, 2013), sendo de 35 MPa para o tráfego de veículos leves e de 50 MPa para veículos de carga.

Alguns motivos da boa aceitação do uso de blocos de concreto para pavimentação intertravada é que não necessita de mão-de-obra especializada e nem equipamentos complexos e caros, facilitando o seu uso para empresas do ramo e prefeituras, além de ajudar na geração de empregos.

### **2.3.1 Materiais Constituintes**

Para a fabricação de blocos de concreto para pavimentação os materiais utilizados são, basicamente, aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo, água e, em determinados casos, podem ser adicionados aditivo, adições minerais e pigmentos. Ou seja, os materiais empregados na produção dos blocos são os mesmos do concreto convencional, considerando que as diferenças são intrínsecas ao processo (SOUSA, 2001).

#### **2.3.1.1 Cimento Portland**

Existem muitos tipos de cimento que podem ser utilizados na fabricação dos blocos de concreto para pavimentação, desde que atendam os limites mínimos de qualidade especificados pelas NBR 5733 (ABNT, 1991), NBR 5735 (ABNT, 1991), NBR 5732 (ANBT, 1991), NBR 11578 (ABNT, 1997) e NBR 5737 (ABNT, 1992).

É comum constatar a preferência dos fabricantes de artefatos de concreto pelo cimento tipo CP V – ARI, que é um cimento de elevada resistência inicial, assim classificado pela NBR 5733 (ABNT, 1991), o que permite a desformagem e acondicionamento de blocos para pavimentação e alvenaria em menos de um dia após sua fabricação. Atualmente, com o mercado da construção civil bastante aquecido, o ganho de elevada resistência inicial se torna

mais um ponto a favor desse tipo de cimento, pois agiliza a produção ao ponto de possibilitar aos fabricantes maior rotatividade de estoque (AMADEI, 2011) e poderem comercializar seu produto ao final de um espaço de tempo muito curto entre o início e o fim da fabricação dos blocos de concreto para pavimentação, sem necessidade de estoques elevados nos pátios das fábricas (OLIVEIRA, 2004).

#### 2.3.1.2 Agregados

Conforme a NBR 9935 (ABNT, 2011), o agregado é um material sem forma e volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e concreto.

De acordo com FABRO et al (2011), as características dos agregados têm significativa influência nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. As partículas quanto mais alongadas, angulosas e ásperas, maior será o consumo de cimento na mistura. Os mesmos autores indicam que do ponto de vista de resistência do concreto, as partículas angulosas são preferíveis, pois implicam em um melhor entrosamento entre as partículas individuais, resultando em uma maior resistência do concreto.

Segundo ALMEIDA et al (2005), os recursos de agregados para a construção civil no Brasil são abundantes, mas em geral distantes dos grandes centros consumidores, porém encontram-se em regiões geologicamente favoráveis a existência de reservas com qualidade adequada às aplicações na construção civil.

A qualidade do concreto, entre outros aspectos também depende da qualidade dos agregados, merecendo especial atenção para o abastecimento do agregado miúdo para a construção civil, que sofre com a escassez de reservas localizadas próximas dos grandes centros consumidores. Muitos fatores vêm contribuindo para esta escassez, entre eles o esgotamento das jazidas em muitos trechos dos rios e o aumento da fiscalização ambiental, onde foram encontradas irregularidades na extração de areia no Rio Jacuí (RS), o que motivou o Ministério Público Federal a suspender a extração até que sejam realizados o zoneamento ecológico econômico ou a perícia judicial no local. Em Porto Alegre, a falta de areia paralisou obras públicas, como os corredores de ônibus BRTs, voltados à Copa do Mundo de 2014, em cinco avenidas (RÁDIO GUAÍBA, 2013). Com o impedimento da extração no Rio Jacuí, as empresas extratoras se obrigaram a procurar novas fontes em lugares mais distantes, onde há muita matéria-prima a ser explorada, porém elevando o custo com transporte até os grandes centros.

Com isso, a busca pelo meio técnico, de alternativas para a substituição parcial ou total do agregado miúdo natural (AMN) tem aumentado significativamente, para fazer frente a esta escassez crescente de oferta e do decorrente aumento de preço do agregado miúdo no mercado. Considerando que pelo menos três quartas partes do volume de concreto são ocupadas pelos agregados, sua qualidade apresenta considerável importância (NEVILLE, 1997).

#### **2.3.1.2.1 Agregado miúdo**

O agregado miúdo é o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009). Esse agregado é utilizado para produzir diversos tipos de concreto para diferentes aplicações. Tanto os agregados que são de origem natural quanto os agregados que se originaram de algum tipo de resíduo sólido devem ter características de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), e ter seus grãos compreendidos na zona utilizável da curva granulométrica.

Os agregados miúdos para emprego em blocos de concreto para pavimentação podem ser naturais (de rio ou de cava) ou artificiais (pó de pedra – areia industrial), proveniente de rochas britadas. Devido a maior oferta em algumas regiões e forma mais arredondada que facilita a moldagem das peças de concreto, a areia natural é a mais utilizada (OLIVEIRA, 2004).

Nos últimos anos, devido ao esgotamento das reservas de areia próximas aos grandes centros, ao aumento do custo com transporte e a criação de leis de proteção ambiental, passou a ser comum o uso de areia de britagem como agregado miúdo para a produção de concretos (SBRIGHI NETO, 2005). A diferença entre a areia natural e a areia de britagem está na forma do grão, onde a areia natural possui grãos com forma mais arredondada, enquanto a areia de britagem é formada por grãos com forma mais angulosos (METHA e MONTEIRO, 2008).

As areias naturais oriundas de jazidas são utilizadas como o agregado miúdo mais comum na produção do concreto em suas diversas aplicações. Muitos estudos utilizaram vários tipos de resíduos sólidos combinados com a areia natural, entre eles, areias usadas de fundição e a escória de fundição como agregado miúdo em substituição parcial a areia natural ou até mesmo em substituição parcial ao cimento.



### **2.3.1.2.2 Agregado graúdo**

O agregado graúdo é o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Assim como o agregado miúdo, o agregado graúdo também é utilizado na produção de diferentes tipos de concreto para as mais variadas aplicações. Para a fabricação de blocos de concreto para pavimentação, a faixa granulométrica do agregado graúdo deve estar compreendida entre 4,75 mm e 12,5 mm NBR 9781 (ABNT, 2013). Assim, ter-se-á uma melhor aderência com a pasta de cimento, resultando em um ganho de resistência tanto à compressão quanto ao desgaste por abrasão (OLIVEIRA, 2004) e ainda um melhor acabamento superficial do bloco.

### **2.3.1.2.3 Água**

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), a água a ser utilizada na dosagem dos blocos de concreto deve ser considerada limpa e isenta de produtos nocivos a hidratação do cimento. Qualquer fonte de água que não seja conhecida suas características, devem ser analisadas antes da sua utilização nos artefatos de concreto.

A quantidade de água empregada em um concreto seco fica entre 5 e 7,5%, diferentemente dos concretos plásticos que requerem um percentual de 8 a 12% de água (OLIVEIRA, 2004). Tango (1994) apud Oliveira (2004) cita que a quantidade de água ideal é a máxima possível compatível com o equipamento de vibro-compressão, desde que não haja prejuízo na desforma e alteração no formato do bloco.

### **2.3.1.2.4 Aditivos**

Os aditivos são produtos adicionados em pequenas quantidades em argamassas e concreto com intuito de melhorar algumas propriedades NBR 11768 (ABNT, 1992).

Rodrigues (1984) apud Oliveira (2004) cita que no caso específico de blocos para pavimentação, os aditivos que melhores resultados podem oferecer são os incorporadores de ar e os pigmentos.

### 2.3.2 Forma e Textura das Partículas

A forma das partículas exerce grande influência sobre a consistência das argamassas e concretos, porém não apresenta influência nos resultados de resistência à compressão (FABRO et al, 2011).

Quando se trata de agregados oriundos de processos diferentes, como a areia de britagem e a areia de rio, os mesmos apresentam diferenças na distribuição granulométrica e principalmente na forma e textura dos grãos, alterando assim o comportamento das argamassas fabricadas com estes agregados, de acordo com Arnold (2011) que analisou a influência da forma das partículas nas propriedades de argamassas de revestimento.

Em seu estudo sobre a influência da forma do agregado miúdo nas propriedades do concreto, Fabro et al (2011) citam que agregados com formas lamelares influenciam negativamente na consistência dos concretos. Os mesmos autores indicam que a forma dos agregados influencia também a coesão e a textura, onde agregados mais arredondados proporcionam concretos com maior fluidez, melhores coesão e textura superficial.

### 2.3.3 Empacotamento

O estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (OLIVEIRA et al 2000 apud CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Para a produção de concretos é desejável que os materiais apresentem uma composição granulométrica contínua, para permitir um melhor arranjo entre as partículas do agregado, aumentando o efeito do empacotamento entre os grãos, que, por consequência, diminuam os espaços vazios, apresentando menores valores de abatimento (LEITE, 2001).

Segundo Pandolfelli et al (2000) apud Buest Neto (2006), a morfologia é um fator que pode alterar a condição de empacotamento das partículas de uma mistura, pois quanto menos esférica for a partícula, menor será o grau de empacotamento de uma distribuição que a contenha.

Fabro et al (2011) citam que um bom empacotamento depende da composição granulométrica, pois quanto mais vazios apresentar, menor será o empacotamento dos grãos. Os mesmos autores descrevem que o empacotamento granular alinhado às interações das

partículas sólidas e líquidas contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento do concreto.

De acordo com Buest Neto (2006), agregados com formato lamelar geram um grande número de vazios, e estes não podem ser preenchidos com partículas de tamanhos menores. O melhor modelo de empacotamento ainda é discutido atualmente. Conforme Pileggi et al. (1996), para realizar o melhor empacotamento das partículas, foram desenvolvidos diversos modelos matemáticos. Com isso, surgiram tanto abordagens discretas, que tratam as partículas individualmente, quanto abordagens contínuas, que consideram todos os diâmetros para as mesmas partículas. Os autores citam os modelos de Furnas e Andreasen como os mais conhecidos e usados. De acordo com Myhre e Hundere (1996), os modelos criados por Furnas, Anderegg e Andreassen & Andersen são os modelos clássicos, sendo o de Furnas mais defendido pelos pesquisadores, mesmo sendo considerado mais difícil e incômodo para ser utilizado. Ainda segundo os autores, o modelo proposto por Andreassen & Andersen é mais simples para se aplicar, porém, sua natureza é semi-empírica. A vantagem desse modelo é que ele não requer fator de forma das partículas, mas é necessário que as partículas tenham formas similares, pois o tamanho e o formato das partículas dos agregados interferem diretamente no resultado do empacotamento.

### **2.3.4 Método de dosagem de concreto para blocos**

De acordo com Recena (2002), a dosagem é um processo pelo qual são escolhidos os materiais, dentre os disponíveis, e determinado o melhor proporcionamento entre cimento, agregados, aditivos e adições, com o objetivo de obter-se um material que atenda os requisitos desejados. Pagnussat (2004) e Amadei (2011) comentam que não existe, até então, uma metodologia consagrada para a dosagem de blocos de concreto para pavimentação. Na maioria das empresas, a técnica de dosagem utilizada é a especificada ou recomendada pelos fabricantes das vibro-prensas.

Segundo Oliveira (2004), existem algumas preocupações em relação à dosagem do concreto para os blocos de pavimentação, pois este é um concreto com consistência de terra úmida e não plástica, como em um bloco estrutural. Num concreto plástico, a pasta ocupa quase que totalmente todos os espaços deixados pelos agregados, enquanto no concreto seco, utilizados para blocos de pavimentação, há presença significativa de ar na mistura. Sendo assim, pode-se afirmar que o princípio do concreto plástico, no qual cita que a menor quantidade de água aumenta a resistência, não vale para o concreto dos blocos de pavimentação.

Devido ao concreto utilizado nesses blocos ser um concreto com baixo teor de água, a relação água/cimento não é um fator determinante para o surgimento de poros nos blocos, e sim o empacotamento e a vibro-prensagem, pois quanto maior a quantidade de água, melhor a trabalhabilidade da mistura, diminuindo o atrito entre os grãos, melhorando a compactação e assim, aumentando a resistência (OLIVEIRA, 2004).

### 2.3.5 Equipamentos

Para a fabricação dos blocos de concreto para pavimentação, primeiramente, é utilizado um misturador mecânico para produzir a mistura do concreto, de onde em seguida é levado através de um sistema de esteiras até as vibro-prensas. Algumas empresas possuem equipamentos mais simples, sem o uso de esteiras. A vibro-prensa, ao mesmo tempo que está recebendo o concreto, fica vibrando para preencher as fôrmas dos moldes. Em seguida, o material nas fôrmas é prensado, sendo compactado, visando eliminar o ar e os espaços vazios na mistura. Esse mecanismo de vibração influencia diretamente na qualidade dos blocos de pavimentação. De acordo com Sousa (2001), equipamentos sob as mesmas condições, mas utilizando diferentes parâmetros de vibração, apresentam resultados diferentes aos blocos. Segundo o autor, estudos comprovaram que a vibração horizontal é mais eficiente, pois a direção que esta se dá é responsável pela capacidade de transmissão da vibração do molde ao concreto.

A Figura 3 mostra um exemplo dos equipamentos citados, onde estão presentes uma vibro-prensa, que é abastecida por um sistema de esteira por onde são carregados os agregados e também uma outra esteira para saída dos blocos após a desmoldagem das fôrmas.



**Figura 3 - Vibro-prensa utilizados na produção dos blocos de concreto para pavimentação.**

Fonte: Santa Fé Máquinas.

Todo o carregamento dos agregados dos silos de armazenagem até o misturador mecânico são realizados através de esteiras, conforme mostra a Figura 4.



**Figura 4 - Esteira de carregamento de agregados.**

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados e a metodologia experimental utilizada neste trabalho, bem como a metodologia e ensaios realizados para caracterizar os resíduos areia fenólica usada de fundição (AFUF) e areia verde usada de fundição (AVUF) e também a areia natural de rio, a areia industrial e a brita-0, e a forma de produção dos blocos de concreto para pavimentação, bem como sua caracterização. A execução do programa experimental iniciou-se pela escolha das areias usadas de fundição e após, a coleta das amostras. Em seguida foram realizados os ensaios para obter a caracterização química, física, térmica e estrutural dos agregados e posteriormente os ensaios com o concreto fresco e após este, a produção dos blocos de concreto, bem como suas caracterizações.

Este trabalho tem como base procedimentos já existentes e consagrados para a fabricação de blocos de concreto para pavimentação e busca através dos diversos métodos de caracterização das AFUF e AVUF, avaliar a viabilidade técnica, ambiental e econômica da reciclagem desses resíduos em concreto, oferecendo assim uma alternativa para que estes resíduos tornem-se um co-produto com valor comercial e ainda evitar custos com descarte e possíveis problemas ambientais causados pela disposição incorreta. Para isso, os resíduos passaram pelos ensaios de caracterização supracitados e posteriormente foram incorporados ao concreto como matéria-prima para a fabricação dos blocos de concreto para pavimentação. Estes blocos, após 7 dias, 28 dias e 56 dias de cura foram avaliados de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013).

Na primeira etapa do programa experimental, foram coletadas as amostras de resíduos de fundição na empresa geradora que posteriormente passaram pela etapa de peneiramento, separação magnética e após isso, foram caracterizados. Na segunda etapa do programa experimental, foi realizado o estudo de empacotamento dos resíduos AFUF e AVUF, tornando-os em um só produto.

Na terceira etapa do programa experimental, produziu-se nesta mesma empresa os blocos de concreto para pavimentação com traços de referência e com traços contendo substituição parcial do agregado miúdo areia natural pela combinação dos resíduos de fundição. Todos os traços foram trabalhados em três classes: traço pobre, traço intermediário e traço rico, partindo do traço referência utilizado na empresa parceira. A quarta etapa deste

estudo foi a elaboração da discussão dos resultados encontrados e a avaliação técnica, ambiental e econômica dos blocos de concreto produzidos.

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir, são apresentados os materiais utilizados nas caracterizações, ensaios e na produção dos blocos de concreto para pavimentação.

#### 3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado na elaboração deste trabalho foi o CP-V ARI RS, que é o mesmo cimento utilizado pela empresa parceira nesse projeto, que doou o cimento para produção dos blocos. Esse tipo de cimento confere características de resistências elevadas em baixas idades, de acordo com a NBR 5737 (ABNT, 1992), colaborando para o processo de produção dos blocos de concreto, que foram desmoldados logo em seguida a sua produção e levado imediatamente para o processo de cura. Na Tabela 2 é apresentada a caracterização química e física do cimento.

**Tabela 2 - Caracterização química e física do cimento.**

Parâmetro	Lote Dezembro 2012
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6,39
SiO <sub>2</sub> (%)	22,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,42
CaO (%)	54,74
MgO (%)	5,07
SO <sub>3</sub> (%)	1,94
Perda ao Fogo (%)	2,81
CaO Livre (%)	1,32
Resíduo Insolúvel (%)	10,17
Equivalente Alcalino (%)	0,78
Expansão à Quente (mm)	0,35
Início de Pega (h:min)	02:52
Fim de Pega (h:min)	03:36
Água Cons.Normal (%)	30,7
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4.636
#200 (%)	0,18
#325 (%)	1,26
fc 1 dia (MPa)	19,1
fc 3 dias (MPa)	33,0
fc 7 dias (MPa)	39,8
fc 28 dias (MPa)	49,8
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,00

Fonte: Cimento Itambé

### 3.1.2 Agregados Miúdos

Os agregados miúdos que foram utilizados neste trabalho e que foram doados pela empresa parceira são a areia natural (AN), que foi utilizada para o traço referência, areia de britagem, também chamada de areia industrial (AI) e os resíduos gerados no processo de fundição que substituíram parcialmente em massa a AN, que são: areia fenólica usada de fundição (AFUF) e areia verde usada de fundição (AVUF).

#### 3.1.2.1 Areia Natural

O agregado miúdo utilizado neste trabalho e que serviu de parâmetro a esta pesquisa é a areia natural, de granulometria conhecida comercialmente como média, de origem quartzosa, procedente do rio Jacuí/RS, cuja distribuição granulométrica e as características físicas serão apresentadas ao longo deste trabalho. A empresa parceira consome em média 1760 m<sup>3</sup> dessa areia por mês.

#### 3.1.2.2 Areia Industrial

A areia industrial ou areia de britagem usada neste trabalho teve origem de pedreira, popularmente chamada de “pó-de-pedra”, oriunda de rocha basáltica, cuja distribuição granulométrica e as características físicas serão apresentadas ao longo deste trabalho.

É comum encontrar em um mesmo lote de areia industrial uma granulometria bastante distinta, desde muito fina até pequenos pedaços de pedra, semelhantes a brita zero.

#### 3.1.2.3 Areia Fenólica Usada de Fundição (AFUF)

A AFUF utilizada nesse trabalho é resultado dos resíduos gerados no processo de produção de ligas fundidas na empresa Metalúrgica Lorscheitter Ltda, uma empresa de pequeno porte com aproximadamente 60 colaboradores atuando no setor de fundição desde a sua fundação em 1988. Localizada no município de São Sebastião do Caí a cerca de 50 km de Porto Alegre, a empresa atende principalmente o setor de fabricação de máquinas, agrícola e automotivo, e construção mecânica, a qual usa moldes fabricados pelo processo de moldagem tipo cura a frio utilizando areia fenólica para fundição, assim como moldes e machos em areia verde. A empresa possui sistema de regeneração das areias usadas, onde parte do volume



gerado volta para o processo e outra parte, cerca de 4 toneladas por mês de areia fenólica usada de fundição são descartadas.

Para que pudesse ser utilizada na produção de concreto para blocos de pavimentação, essa areia foi destorroada na própria fundição através de um destorroador mecânico e depois passou por dois processos diferentes de segregação: no primeiro, a areia foi peneirada manualmente em uma peneira de abertura de 1,68 mm (ABNT nº 12) para retirada de materiais diversos que estivessem presentes e no segundo processo, foi realizada a remoção do material metálico remanescente com menores partículas através de um bastão magnético. A separação magnética se fez necessária, pois a presença de materiais metálicos pode gerar corrosão e manchas nos blocos de concreto para pavimentação. Após esta etapa, foram realizados diversos ensaios de caracterização dessa areia.

#### 3.1.2.4 Areia Verde Usada de Fundição (AVUF)

Assim como a AFUF, a AVUF que foi utilizada nesse trabalho também é resultado dos resíduos gerados no processo de produção de ligas fundidas na empresa Metalúrgica Lorscheitter, onde esta areia é utilizada no processo de confecção de moldes e machos para fabricação de peças fundidas. A empresa descarta em torno de 3 toneladas por mês de AVUF.

A areia verde usada passou pelo mesmo processo de destorroamento, peneiramento e separação magnética da areia fenólica, para em seguida ser caracterizada antes de seu uso como matéria-prima na fabricação de blocos de concreto para pavimentação.

#### 3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo empregado na dosagem dos blocos para a elaboração deste trabalho é o comercialmente denominado de brita zero (B-0), também conhecida por pedrisco e foi cedido pela empresa parceira desta pesquisa. A forma e a granulometria dessa brita deve garantir acabamento aos blocos de concreto para pavimentação. Este tipo de material é o mais usualmente utilizado na dosagem de blocos de concreto intertravados, pois sua granulometria tem pouca influência sobre o acabamento dos blocos.

### **3.1.4 Água**

A água utilizada na dosagem dos blocos de concreto foi a mesma disponibilizada pelo sistema de abastecimento local, na cidade onde está situada a empresa de artefatos de concreto.

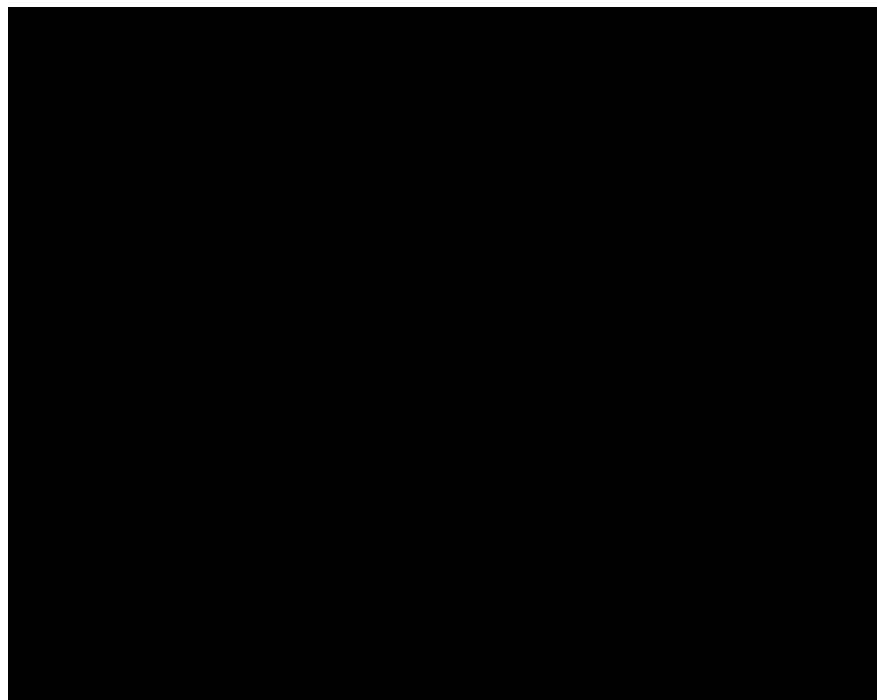
### **3.1.5 Aditivo**

O aditivo utilizado na produção do concreto para os blocos de pavimentação deste trabalho foi o Hagen DT Plus, que é um composto químico isento de cloretos e pode ser usado como aditivo plastificante para blocos de concreto e outros artefatos de cimento e pré-fabricados de concreto. Este aditivo pode ser usado nos percentuais entre 0,1 e 0,3% em relação à massa de cimento.

O Hagen DT Plus tem como finalidade facilitar a desforma das peças, aumentar a resistência, melhor a aparência das peças e reduzir o risco de possíveis fissuras. Como efeito secundário, pode ocasionar o aumento da impermeabilidade dessas peças.

## **3.2 METODOLOGIA**

A preparação e caracterização dos resíduos de fundição e agregados da construção civil para o uso no presente trabalho foram realizadas de acordo com o fluxograma da Figura 5 que mostra como foi desenvolvida a primeira etapa do programa experimental. Nesta etapa os resíduos de fundição areia fenólica usada de fundição (AFUF) e a areia verde usada de fundição (AVUF) foram coletados na empresa geradora e caracterizados no laboratório de material de construção (LMC) e de caracterização e valorização de materiais (LCVMAT) da Unisinos.



**Figura 5 - Fluxograma de caracterização da AFUF e AVUF.**

### **3.2.1 Coleta das Amostras**

Na primeira etapa do programa experimental, foram coletadas as amostras de resíduos de fundição na empresa geradora desses resíduos, onde ambas estavam segregadas no pátio da empresa, conforme haviam saído dos seus respectivos processos de uso. As amostras foram coletadas através de pás e armazenadas em tonéis, sendo dimensionadas para que houvesse material suficiente para a execução completa do programa experimental proposto, e ainda colocando uma quantidade superior caso houvesse possíveis perdas durante os ensaios. Sendo assim, foram obtidos 400 Kg de AFUF e 400 Kg de AVUF. A AFUF precisou, ainda na empresa geradora, passar por um destorroador mecânico para quebrar seus torrões antes de coletarmos. Também foram coletadas as amostras de cimento (40 Kg), areia natural (AN) (80 Kg), areia industrial (40 Kg) e brita zero (50 Kg) na empresa fabricante de artefatos de concreto parceira neste trabalho. As amostras foram coletadas com a utilização de pás e acondicionadas em tonéis que foram mantidos fechados para evitar possíveis contaminações e posteriormente levadas para a Unisinos, onde foram armazenados no laboratório de fundição da Unisinos e em seguida deu-se sequência nos procedimentos.

A Figura 6 mostra os resíduos sendo coletados na empresa de fundição, onde a AVUF estava armazenada em sacos e a AFUF foi destorroada momentos antes da coleta.



(a)

(b)

**Figura 6 - Coleta da AVUF (a) e AFUF direto do destorroador (b) na empresa geradora.**

### 3.2.2 Peneiramento das Areias Usadas de Fundição

Após as coletas, foram separadas as amostras de AFUF e AVUF através de quarteamento, após passaram por um processo de peneiramento em peneira com abertura da malha de 1,68 mm (ABNT 12) para retirada de materiais diversos que estivessem presentes e em seguida foi realizado a separação magnética através do uso de um imã e de um bastão magnético, visando retirar qualquer material metálico e outras substâncias de maior granulometria que pudesse interferir nas características do concreto e posteriormente no bloco de pavimentação. A partir daí, foram realizadas as caracterizações desses resíduos e dos agregados.

### 3.2.3 Caracterização dos Resíduos e Agregados

As areias usadas de fundição e os agregados passaram pelos seguintes processos de caracterização:

#### 3.2.3.1 Caracterização Física

Os resíduos e agregados foram caracterizados na forma física através dos ensaios de umidade, massa específica e granulometria nos LCVMAT e LMC, respectivamente.

##### I. Umidade

A umidade dos resíduos e agregados foi determinada através do equipamento próprio para este fim, modelo padrão da marca Bel Engineering, onde foi pesada uma cápsula com material de cada amostra coletada e depois com material seco em estufa a  $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$  até constância de massa. A diferença entre as massas é o teor de umidade, que é expresso em %. Esse teor é muito importante para definição da relação água/cimento do concreto, porém é

variável na própria pilha do agregado e ao decorrer do dia, dependendo das condições climáticas..

## II. Massa específica

A massa específica dos resíduos e agregados foi determinada de acordo com a NBR NM 52 (2009), a qual cita que a massa específica do agregado é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis.

A Figura 7 mostra o resíduo AFUF e o agregado AI sendo preparados para o ensaio de massa específica.



**Figura 7 - Preparação dos resíduos de fundição (a) e o agregado AI (b) para o ensaio de massa específica.**

## III. Granulometria

O ensaio de granulometria dos agregados foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), visando identificar a distribuição granulométrica, além do módulo de finura e a dimensão máxima característica dos grãos e comparar os resíduos com os agregados.

### 3.2.3.2 Caracterização Química

Os resíduos de fundição foram caracterizados na forma química através dos ensaios de perda ao fogo e fluorescência de Raios-X (FRX).

#### I. Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo quantifica o material orgânico existente na amostra analisada, como por exemplo, o carbono livre e o dióxido de carbono provenientes dos hidratos e carbonatos, bem como a quantidade de água combinada. Este ensaio foi realizado

de acordo com a norma CEMP nº 120. Este ensaio consiste em colocar 1 g de amostra previamente seca em estufa a 105°C, em um forno tipo mufla a 950°C por um período de 3 horas ou até atingir massa constante. Após este tempo, o material foi pesado e a diferença entre o peso inicial e o peso final foi o resultado encontrado para a análise de perda ao fogo da amostra analisada.

## II. Fluorêscencia de raios-X (FRX)

A FRX é uma técnica não-destrutiva e serve para todos os tipos de amostras. Nesse ensaio, determinou-se a composição química do material analisado, realizando uma análise qualitativa para avaliar os elementos presentes e depois uma análise quantitativa a partir de um padrão de cinza de casca de arroz. O equipamento utilizado foi um Espectrômetro de Fluorêscencia de Raios-X por Energia Dispersiva, modelo EDX 720 HS, marca Shimadzu do Brasil.

### 3.2.3.3 Caracterização Estrutural

A caracterização estrutural dos resíduos foi realizada através dos ensaios mineralógico e microestrutural.

## I. Difração de raios-X (DRX)

A difração de raios-X é uma técnica utilizada para determinar as fases cristalinas de uma amostra. Esta técnica consiste em um feixe de raios-X que difrata em um material cuja as fases cristalinas são desconhecidas, apontando a medida do ângulo de difração do raio emergente que pode elucidar a distância dos átomos no cristal e conseqüentemente, a estrutura cristalina. Através do uso de um dispositivo capaz de detectar os raios difratados, pode-se traçar o desenho da rede cristalina e a forma da estrutura gerada pelo espalhamento que refletiu e difratou os raios-X, gerando assim o difratograma. As amostras de cada um dos resíduos foram preparadas para este ensaio da seguinte maneira: secagem das amostras em estufa a 100°C por 24 horas, após este período, as amostras foram moídas manualmente em um gral de ágata até que suas granulometrias tornassem passantes em uma peneira ABNT 200 (0,075 mm). Após a preparação, as amostras foram analisadas no difratômetro de raios-X, modelo 500 da marca Siemens.

## II. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) consiste em “capturar” imagens de qualquer material sólido com elevada resolução e nitidez, nesse caso, podendo visualizar as formas dos grãos dos materiais analisados. Assim, pode-se definir a morfologia dos grãos dos

resíduos e agregados. O equipamento utilizado para caracterização morfológica foi um modelo EVO LS15 da marca ZEISS, realizado pelo laboratório Itt Fuse da Unisinos.

### **3.2.4 Empacotamento**

Conforme foi citado no item 2.3.3, para a produção de concretos é desejável que os materiais apresentem uma composição granulométrica contínua, assim permitindo um melhor arranjo entre as partículas dos agregados, aumentando o efeito do empacotamento entre os grãos e, por conseqüência, diminuindo os espaços vazios. Após a etapa de caracterização dos resíduos, foi através o ensaio de empacotamento na segunda etapa deste trabalho, onde buscou-se encontrar a melhor combinação entre os dois resíduos de fundição, AFUF e AVUF, para alcançar as características desejáveis em termos de distribuição granulométrica que resultasse no melhor arranjo entre os grãos, assim, encontrando as proporções ideais de cada um.

Então, o que era originalmente dois resíduos de fundição passou a ser uma única matéria-prima originada na indústria de fundição e que serviu de agregado miúdo para ser usado como substituto parcial da areia natural de rio nos blocos de concreto para pavimentação. Este ensaio utilizou um modelo matemático que correlaciona as massas específicas e unitária dos resíduos para encontrar o proporcionamento que produz o menor volume de vazios, assim, encontrando o que se julgou ser o empacotamento ideal. Este ensaio consiste em retirar totalmente a umidade das amostras. As amostras permaneceram em estufa a 100°C (+/-5°C) até a constância de massa. Em seguida, as amostras foram pesadas (3 vias) (três pesagens para cada amostra), primeiro com AVUF 100% e depois o proporcionamento, iniciando com AFUF 10% e AVUF 90%, depois com AFUF 20% e AVUF 80% e assim sucessivamente até chegar em AFUF 100%. De posse dos dados do valor médio das pesagens e da massa específica da AFUF e da AVUF calculadas anteriormente, foi calculado a massa unitária e a massa específica para cada percentual de proporcionamento.

A Figura 8 mostra uma imagem dos dois resíduos de fundição sendo misturados e homogeneizados para o ensaio de empacotamento.



**Figura 8 - Co-produto formado pelo empacotamento dos resíduos de fundição AFUV e AVUF.**

Com os valores encontrados, foi calculado o volume de vazios através da

$$V_v = \left( \frac{me - mu}{me} \right) \cdot 100$$

**Equação 1**

onde:

$V_v$  = Volume de vazios (%);

$me$  = Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

$mu$  = Massa unitária ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Após o estudo onde se obteve a maior massa unitária e o menor volume de vazios, encontrou-se no proporcionamento de 60% de AVUF com 40% de AVUF o melhor empacotamento entre os dois resíduos de fundição.

### 3.2.5 Método de Produção dos Blocos

A quarta etapa do programa experimental foi a produção dos blocos de concreto tipo Unistein 8 em escala industrial na empresa parceira, onde utilizou-se o mesmo material (agregados, aglomerante e aditivo), os mesmos equipamentos e parâmetros e o traço utilizado pela empresa como traço intermediário de referência para este trabalho e a partir deste, a formação dos traços contendo substituição parcial do agregado miúdo areia natural pela combinação formada pelos resíduos de fundição. Todos os traços foram trabalhados em três classes: traço pobre, traço intermediário e traço rico, ambos partindo do traço referência utilizado na empresa parceira. A Tabela 3 mostra os traços utilizados neste trabalho.



**Tabela 3 - Traços produzidos com substituição do agregado miúdo AN pela combinação dos resíduos.**

<b>Traço</b>	<b>Classe</b>	<b>Proporção de agregados</b>
<b>TREF1</b>	Pobre	AN - 100%
<b>TREF2</b>	Intermediário	AN - 100%
<b>TREF3</b>	Rico	AN - 100%
<b>TS1</b>	Pobre	AN - 75% - AFUF/AVUF 60/40 - 25%
<b>TS2</b>	Intermediário	AN - 75% - AFUF/AVUF 60/40 - 25%
<b>TS3</b>	Rico	AN - 75% - AFUF/AVUF 60/40 - 25%
<b>TS4</b>	Pobre	AN - 50% - AFUF/AVUF 60/40 - 50%
<b>TS5</b>	Intermediário	AN - 50% - AFUF/AVUF 60/40 - 50%
<b>TS6</b>	Rico	AN - 50% - AFUF/AVUF 60/40 - 50%

A produção do concreto e dos blocos de concreto para pavimentação foi realizada na empresa fabricante de artefatos de concreto, parceira na realização deste trabalho. Os agregados foram carregados dos silos de armazenagem até o misturador por meio de esteiras, já o cimento foi conduzido por tubulações e em seguida foi acrescentado manualmente água e aditivo. Todo o material foi homogeneizado no misturador e o ponto ideal da massa foi obtido através do ensaio “ponto de pelota”, e assim definiu-se a relação água/cimento para o respectivo traço. Para cada traço, foi realizado o mesmo procedimento. Após a produção do concreto no misturador mecânico e quando este se encontrou no ponto ideal, o concreto foi transferido via esteira, do misturador até o equipamento de vibro-prensagem, modelo Rauzi 715, com capacidade para produzir 09 blocos por ciclo. Chegando na vibro-prensa, o concreto foi sendo acondicionado nas fôrmas por meio de vibração para acomodar as partículas e em seguida ocorreu a prensagem juntamente com a vibração. Imediatamente após esse processo foi realizada a desforma (Figura 9), quando o molde posicionado sobre uma placa de madeira móvel se elevou e então essa placa foi removida manualmente e os blocos levados para o processo de cura.



**Figura 9 - Desmoldagem dos blocos de concreto após a vibro-prensagem.**

#### 3.2.5.1 Materiais Utilizados

Os agregados, o cimento, o aditivo e os resíduos utilizados para a produção dos blocos para este trabalho foram os mesmos caracterizados e citados anteriormente. Esses materiais, com exceção da combinação dos resíduos, foram os mesmos que estavam sendo utilizados pela empresa parceira para a fabricação de seus blocos e outros artefatos de concreto na época desta pesquisa. Já os resíduos, foram os mesmos coletados na empresa de fundição e que foram caracterizados no início deste trabalho.

#### 3.2.5.2 Dosagem do Traço de Referência

A dosagem do traço de referência utilizada para a fabricação dos blocos deste trabalho foi exatamente a mesma que a empresa fabricante dos blocos utiliza. Essa dosagem foi realizada na própria empresa onde foram confeccionados os blocos. Recena (2002) salienta que a qualidade dos materiais empregados e a cultura da região onde esta inserida a empresa fabricante dos blocos interferem na qualidade do concreto. A presente dissertação realizou a produção dos blocos de concreto de maneira semelhante ao caso citado, onde a maioria das empresas fabricantes de artefatos de concreto não utilizam nenhum método específico de dosagem e também não caracterizam seus agregados e sim, tem método de dosagem de acordo com seu equipamento e conforme se encontram as características de seus

materiais, porém, atendendo as normas brasileiras e as solicitações que o mercado exige em relação à resistência à compressão e aspecto visual.

Como o objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica, ambiental e econômica dos blocos produzidos com substituição parcial do agregado miúdo areia natural pelo co-produto de fundição, em uma situação real de mercado, esta avaliação teve maior êxito no momento em que se produziu os blocos com os mesmos materiais, traços, parâmetros e equipamentos utilizados pela empresa parceira e então fez-se a comparação dos resultados, juntamente com os critérios estabelecidos pelas NBR's. Com isso comparou-se diretamente um produto comercialmente ativo com os resultados desta pesquisa.

O traço de referência utilizado foi de 1 : 5,96, com 100% de areia natural, que é o traço utilizado pela empresa fabricante dos blocos e que ficou estabelecido como o traço padrão de referência para esta pesquisa. A partir deste traço foram elaborados mais dois traços, um mais pobre em consumo de cimento, com traço de 1 : 6,5 e um traço mais rico em consumo de cimento de 1 : 5,5, para avaliar as características do bloco com esta dosagem e em ambos os casos, avaliar o comportamento dos blocos utilizando o co-produto.

Para definir o ponto ideal da massa, sabendo que não existe um teste de consistência ou trabalhabilidade específico para o concreto seco, utilizou-se o mesmo método que a empresa usava na época desta pesquisa, que é o “Método do Ponto de Pelota”, sugerido por Scott Hood (2006) para definir o ponto ideal da massa e a quantidade correta de água nos concretos com diferentes consumos de cimento do traço referência. O ponto de pelota ideal acontece quando ao colocar uma quantidade de concreto nas mãos secas, este adquire consistência para se firmar sem deixar resíduos e umidade nas mãos. Se o concreto se soltar, significa que deve-se adicionar mais água, caso a mão fique com resíduos ou muito úmida, deve-se diminuir a quantidade de água, corrigindo a relação água/cimento.

#### 3.2.5.3 Dosagem dos Traços com Substituição do Agregado Miúdo pelo Co-produto

A dosagem dos traços com substituição parcial da areia natural pelo co-produto deu-se da mesma forma que a dosagem do traço referência, citado no item 3.2.5.2. Nesta etapa, também empregou-se os três traços dosados com areia natural.

#### 3.2.5.4 Consumo de Cimento

A Tabela 4 mostra o consumo de cimento para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto de acordo com cada traço produzido.

**Tabela 4 - Consumo de cimento por m<sup>3</sup> de cada traço produzido.**

Traço		Consumo de Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Diferença em relação ao TREF2 [traço padrão] (%)
0% P	TREF1	341	-6
0% I	TREF2	364	0
0% R	TREF3	390	7
25% P	TS1	334	-8
25% I	TS2	357	-2
25% R	TS3	383	5
50% P	TS4	323	-11
50% I	TS5	345	-5
50% R	TS6	363	0

Onde: P = pobre em consumo de cimento, I = intermediário e R = rico em consumo de cimento.

Nota-se que os traços pobres com substituição da AN pela combinação de AFUF E AVUF apresentaram boa redução no consumo de cimento, o que levaria a uma redução de custo considerável na produção de concreto com estes traços, levando em consideração a diminuição do cimento e a utilização da combinação de resíduos (menor valor) em substituição parcial a AN. Cabe salientar que esta hipótese só seria válida se a resistência alcançada pelos blocos com esses traços atingisse os valores mínimos requeridos pelas normas ou solicitações comerciais.

Já os traços intermediários tiveram uma pequena redução no consumo de cimento em relação ao traço padrão, enquanto o traço rico com 25% da mistura de resíduos aumentou apenas 5% e o traço com 50% obteve consumo igual ao traço referência.

#### 3.2.5.5 Produção dos Blocos

A produção dos blocos foi realizada através da aleatorização das moldagens, para evitar um efeito de um fator não controlável com o efeito dos fatores de controle e fez-se da seguinte maneira: iniciou-se pelo TREF1, seguido pelo TS2 e TS6 no primeiro dia de produção. No segundo dia, os blocos foram moldados pela seguinte ordem: TREF2, TS3 e TS4. No terceiro dia, a ordem de moldagem foi: TREF3, TS1 e TS5. Em todos os três dias foram moldados um lote de traço pobre, um de traço intermediário e um lote de traço rico.

Na Tabela 5 pode-se verificar que variou a relação água/cimento em alguns traços, isso devido a correções necessárias com o acréscimo de água para atingir o ponto de pelota, onde, ao utilizar maior percentual da mistura de resíduos, foi necessário aumentar a relação água/cimento.

Tabela 5 - Relação água/cimento para os diferentes traços produzidos

Traço	Classe	Proporção de agregados	Rel. a/c
TREF1	Pobre	AN - 100%	0,10
TREF2	Intermediário	AN - 100%	0,10
TREF3	Rico	AN - 100%	0,10
TS1	Pobre	AN - 75% - AFUF/AVUF 60/40 - 25%	0,10
TS2	Intermediário	AN - 75% - AFUF/AVUF 60/40 - 25%	0,10
TS3	Rico	AN - 75% - AFUF/AVUF 60/40 - 25%	0,10
TS4	Pobre	AN - 50% - AFUF/AVUF 60/40 - 50%	0,15
TS5	Intermediário	AN - 50% - AFUF/AVUF 60/40 - 50%	0,15
TS6	Rico	AN - 50% - AFUF/AVUF 60/40 - 50%	0,20

Ao total foram moldados 278 blocos, incluindo os com traço de referência, sendo que para cada traço foi utilizado no mínimo 12 (doze) blocos para ensaio de resistência a compressão aos 7 e 28 dias de cura, 02 (dois) blocos para ensaio de resistência ao desgaste por abrasão, 06 (seis) blocos para o ensaio de absorção de água e os demais como reserva. Para o ensaio de características ambientais, foram utilizados pedaços de um bloco com substituição da areia natural pelo co-produto, rompido no ensaio de resistência a compressão mecânica.

A Figura 10 mostra imagens dos blocos de concreto produzidos com 25% de substituição da AN pela combinação da AFUF e AVUF.



Figura 10 - Blocos de concreto para pavimentação produzidos com 25% de substituição da AN pela combinação da AFUF e AVUF.

### 3.2.5.6 Cura dos Blocos de Concreto

Tão logo ocorreu a produção dos blocos de concreto, os mesmos foram armazenados em pallets de madeira, em local protegido das intempéries, e em seguida foram

cobertos por uma lona para minimizar a perda do calor de hidratação, conforme mostra a Figura 11. Após 24 horas, os blocos foram removidos para o pátio da empresa, ficando expostos às condições ambientais e sendo molhados ao final do dia, por sete dias consecutivos. Esse processo aconteceu dessa maneira pelo fato das câmaras úmidas da empresa e da Unisinos estarem indisponíveis.



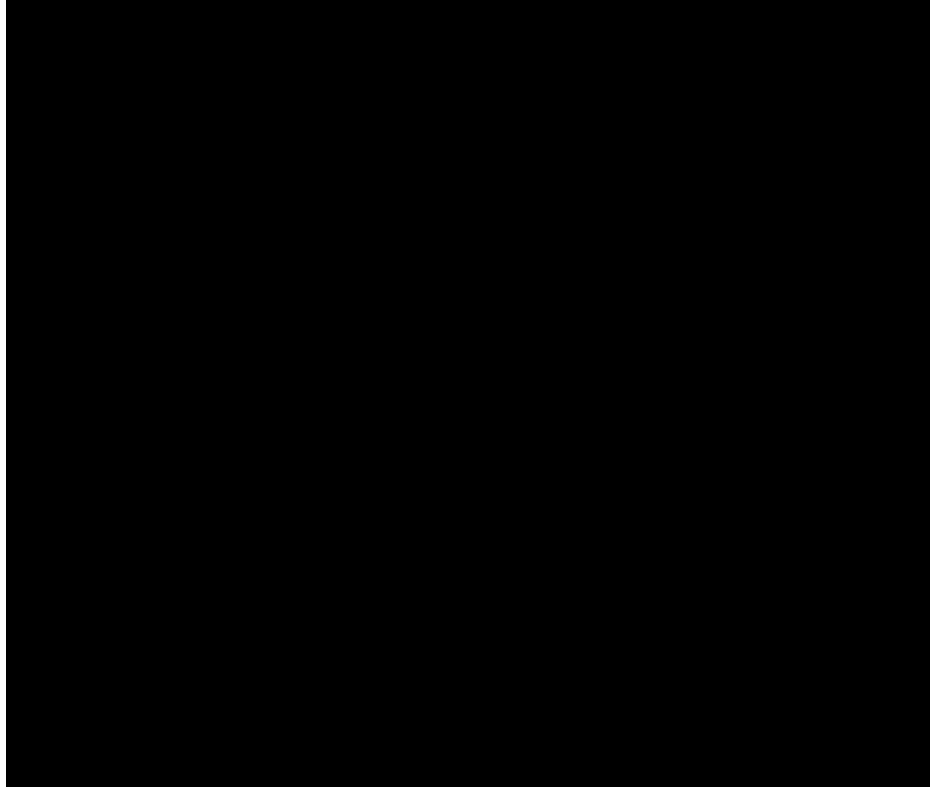
**Figura 11 - Blocos armazenados no primeiro dia de cura.**

Com todos os blocos produzidos e após o tempo de cura de 7 e 28 dias necessários para os ensaios previstos, iniciou-se as avaliações nas propriedades físicas, mecânicas e ambientais desses blocos, conforme será apresentado no item 3.3.

### **3.3 PROPRIEDADES AVALIADAS NOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Neste item serão apresentados os ensaios aos quais foram submetidos os blocos de referência e os blocos com substituição parcial do agregado miúdo pelo co-produto, produzidos para este trabalho.

O fluxograma de avaliação dos blocos obtidos neste trabalho esta representado pela Figura 12.



**Figura 12 - Fluxograma de avaliação dos blocos de concretos produzidos**

### **3.3.1 Resistência Mecânica à Compressão**

Esse ensaio foi atribuído aos blocos com traço de referência e nos traços com diferentes teores de substituição, nas idades de 7 dias, visando atestar as características do cimento CPV-ARIRS, que confere resistência elevada já nos primeiros dias de cura e ainda, verificar o comportamento da resistência neste período inicial de cura, pois muitas vezes são utilizados blocos com pouca idade para construção de pavimentos, e 28 dias, pois é a idade característica para esse ensaio e padrão utilizado em outros estudos. Os procedimentos seguiram as exigências prescritas na NBR 9781 (ABNT, 2013).

Tanto as peças com o traço de referência quanto as peças com traços de substituição de AN pelo co-produto foram capeadas em ambas as faces com uma argamassa de traço 1:2 e após 24 horas de cura do capeamento foram submersas, por um período mínimo de 24 horas, visando uma saturação completa d'água antes do rompimento.



**Figura 13 - Capeamento dos blocos para ensaio de resistência à compressão.**

Para a realização do ensaio de resistência mecânica à compressão foram submetidos 6 (seis) blocos para cada traço, conforme solicitação da norma. De acordo com o que descreve a NBR 9781 (ABNT, 2013), a resistência à compressão (em MPa) das peças são obtidas dividindo-se a carga de ruptura (em N), pela área de carregamento (em mm<sup>2</sup>), multiplicando-se o resultado por um fator “p”, que é função da altura da peça. Este fator “p” está descrito na Tabela 6

**Tabela 6 - Fator "p" para blocos de concreto para pavimentação.**

Altura nominal da peça (mm)	Fator multiplicativo "p"
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013)

O equipamento utilizado para a realização deste ensaio é chamado de “prensa para ensaios de compressão microprocessada”, modelo Sercomp 2 C80/ES, classe I, com capacidade de carga até 2000 KN, disponibilizado pelo Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos.

A Figura 14 mostra um bloco no equipamento momentos antes de ser realizado o ensaio.





**Figura 14 - Ensaio de rompimento dos blocos para medir a resistência mecânica à compressão.**

O equipamento utilizado fornece o valor da carga em N e o valor da resistência à compressão em MPa. De posse dos resultados, calcula-se o desvio padrão, que é dado pela Equação 2.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (f_c - f_{ci})^2}{n - 1}}$$

**Equação 2**

Onde:

S = desvio padrão amostral (MPa)

$f_c$  = resistência média das peças (MPa)

$f_{ci}$  = resistência individual das peças (MPa)

n = número de peças amostradas

Os resultados obtidos no ensaio de compressão podem ser considerados como um balizador para definição da aplicabilidade dos blocos produzidos em seus diferentes traços, pelo alcance ou não da resistência requerida pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

### **3.3.2 Absorção de Água**

Mesmo com a ausência de normas nacionais específicas de absorção de água para blocos de concreto para pavimentação, esta é uma característica muito importante que deve ser considerada, pois terá reflexo direto na qualidade dos blocos produzidos.

Conforme Cruz (2003), a absorção de água pode mensurar a durabilidade dos blocos, pois os blocos de concreto com maior absorção de água são também os blocos com maior volume de vazios, e em geral, menos resistentes. Além disso, podem lixiviar produtos

de hidratação do cimento mais facilmente, causando, por exemplo, eflorescências que podem vir a prejudicar o aspecto estético do pavimento.

Como não há norma específica para a realização do ensaio de absorção de água para blocos de concreto para pavimentação, foi utilizado neste trabalho uma adaptação da NBR 12118 (ABNT, 2011) para blocos vazados de concreto simples para alvenaria e da NBR 9778 (ABNT, 2009) para argamassa e concretos endurecidos. O procedimento utilizado está descrito a seguir:

- I. Secagem da amostra em estufa
  - a. Os blocos foram secados em estufa na temperatura de  $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$  por um período de 72h.
  - b. Após a secagem, os blocos foram pesados em sala com temperatura e umidade controladas e determinado a massa seca ( $M_s$ ), em gramas.
  
- II. Saturação da amostra e determinação de sua massa na condição saturada e imersa em água.
  - a. Depois de frios, os blocos foram imersos em água à temperatura de  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  e mantidos durante 72 horas nessa condição;
  - b. Após esse período, foi registrado a massa dos blocos imersos em água ( $M_i$ ) na balança hidrostática, em gramas;
  - c. Para finalizar, foi retirado o excedente de água da superfície dos blocos com um pano úmido e determinado a sua massa ( $M_{sat}$ ), em gramas.

O valor da absorção de água é expresso em porcentagem e é dado pela Equação 3.

$$A = \left( \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

A = absorção de água (%)

$M_s$  = massa do bloco após secagem em estufa (g)

$M_{sat}$  = massa do bloco saturado de água (g)

O ensaio de absorção de água foi realizado aos 28 dias de cura dos blocos, por ser a idade característica para avaliação neste trabalho.

### 3.3.3 Índice de Vazios

De acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009), o índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Igualmente ao ensaio de absorção de água, não existe uma metodologia universal que deva ser adotada para ensaiar o índice de vazios dos blocos de concreto para pavimentação. O procedimento utilizado para este ensaio foi o mesmo citado para o ensaio de absorção de água. O índice de vazios foi calculado pela Equação 4.

$$I_v = \left( \frac{M_{sat} - MS}{M_{sat} - M_i} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$I_v$  = índice de vazios (%)

$M_{sat}$  = Massa do bloco saturada em água após imersão (g)

$M_s$  = Massa do bloco seco em estufa (g)

$M_i$  = Massa do bloco saturado imerso em água (g)

Um índice de vazios com valor alto não é recomendado, pois pode interferir na resistência mecânica dos blocos.

### 3.3.4 Resistência ao Desgaste por Abrasão

Assim como a resistência mecânica à compressão, o índice de desgaste por abrasão dos blocos de concreto para pavimentação quando expostos ao tráfego de veículos e pedestres, também é um parâmetro muito importante e deve ser analisado com cuidado para garantir a qualidade do produto final. Conforme Mehta e Monteiro (1994), a abrasão pode ser definida com um atrito seco, predominante em pavimentos, devido ao tráfego tanto de pessoas, quanto de veículos.

Ainda não existe um único método para ensaiar a resistência ao desgaste por abrasão dos blocos de concreto para pavimentação que seja adotado universalmente. Existem diversas metodologias, mas cada uma com suas especificações (Oliveira, 2004). Pagnussat (2004) utilizou em seu trabalho o “método CIENTEC”, como o método para medir a resistência ao desgaste por abrasão. Para a presente dissertação, também se utilizou este mesmo método que foi realizado pela Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio

Grande do Sul (CIENTEC), através do método criado internamente para a avaliação do desgaste dos blocos de concreto para pavimentação, que é chamado de “Método CIENTEC de Desgaste à Abrasão”, onde de cada bloco são extraídas duas amostras por meio de serra circular diamantada e em seguida simula-se um percurso de 500 metros percorridos pelo corpo-de-prova submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre pó abrasivo carborundo. O resultado deste ensaio é apresentado pela média do índice de desgaste dos corpos-de-prova em mm, o que corresponde à média das diferenças dentre as alturas iniciais e finais de cinco pontos do corpo de prova. Para este ensaio, utilizou-se blocos com traço de referência e com traço de substituição que apresentou melhor resultado no ensaio de resistência a compressão.

### **3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV**

Através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), pode-se obter imagens da microestrutura dos blocos de concreto com elevada resolução e nitidez, o que permite avaliar a morfologia dos grãos dos materiais analisados.

Embora o concreto é o material estrutural mais amplamente utilizado, a sua microestrutura é heterogênea e altamente complexa. Os fatores que influenciam o comportamento mecânico das fases C-S-H são: tamanho e forma das partículas, a distribuição, a concentração e a orientação das partículas, a topologia da mistura, a composição das fases dispersa / contínua e a estrutura dos poros (SIDDIQUE et al, 2011).

### **3.3.6 Avaliação Ambiental**

A avaliação ambiental se faz necessária para atestar que o produto gerado a partir da substituição de AN por resíduos de fundição na fabricação de blocos de concreto, possa ser comercializado e seu uso não trará danos ao meio ambiente, uma vez que todos os demais parâmetros estejam de acordo com as normas. Após os ensaios mecânicos, foram realizadas avaliações ambientais através dos ensaios de lixiviação e de solubilização, com intuito de verificar se os blocos com traços de substituição da areia natural pela combinação da AFUF e AVUF poderiam lixiviar alguma substância nociva e qual a classificação ambiental do material bloco de concreto para pavimentação.

Os blocos produzidos com a AFUF e a AVUF em substituição parcial da areia natural, foram caracterizados ambientalmente pelo ensaio de lixiviação, de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004). Para este ensaio, utilizou-se um bloco com idade de cura de 28

dias, que foi triturado até que sua granulometria se tornasse passante na peneira de 9,5 mm. Após, a amostra foi enviada para uma empresa especializada para realizar o ensaio.

O ensaio de solubilização foi realizado de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004), pela mesma empresa que realizou o ensaio de lixiviação, usando a mesma amostra preparada para o ensaio anterior.

### **3.3.7 Avaliação Econômica**

A viabilidade econômica foi avaliada através de um comparativo entre os custos dos insumos para fabricação dos blocos de concreto padrão produzidos pela empresa parceira deste trabalho, e a fabricação dos blocos de concreto com substituição parcial do agregado miúdo areia natural pela combinação dos resíduos de fundição, tomando como base os blocos com o traço que apresentou os melhores resultados quanto às suas características físicas, mecânicas e ambientais. Os custos com mão-de-obra não foram computados, pois não mudaram, independente dos insumos utilizados. Como a empresa de artefatos de concreto compra a areia natural de uma fonte com distância similar a empresa geradora dos resíduos, o valor de frete não foi computado na avaliação econômica, pois teria praticamente o mesmo valor pago atualmente, assim como os demais materiais que permaneceram os mesmos.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste ítem serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas caracterizações dos resíduos e agregados, bem como os resultados das avaliações dos blocos obtidos neste trabalho. Cabe salientar que os agregados caracterizados são aqueles utilizados no processo industrial da empresa parceira do projeto.

### **4.1 RESULTADO DAS CARACTERIZAÇÕES DOS RESÍDUOS E AGREGADOS**

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de todos os ensaios aos quais foram submetidos os resíduos e os agregados utilizados na produção dos blocos de concreto para pavimentação.

#### **4.1.1 Caracterização Física**

Para a caracterização física dos resíduos e agregados, foram utilizados os seguintes ensaios: umidade, massa específica, massa unitária e granulometria.

##### **4.1.1.1 Umidade**

Todos os agregados foram analisados em diferentes lotes, de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.3.1. A Tabela 7 aponta os resultados desse ensaio, mostrando o percentual de umidade do lote 1, primeiro material recolhido nas empresas de fundição e de artefatos de concreto para realizar os ensaios desse trabalho e, o nomeado como lote 2, coletado 30 dias depois do primeiro lote, com material utilizado para verificar o comportamento com o tempo do teor de umidade dos agregados nas empresas, visto que as mesmas não possuem total controle sobre esse parâmetro. O teor de umidade pode variar mesmo ao longo do dia. Tanto é que a norma de controle do concreto NBR 12655 (ABNT, 2006), dentro da classificação dos tipos de dosagem prevê, para a condição A (com controle total), que sejam feitas pelo menos 3 verificações da umidade dos agregados ao longo do dia, para que se possa ter uma melhor definição da relação a/c.

**Tabela 7 - Teor de umidade dos resíduos e agregados**

Agregados	Teor de Umidade (%)	
	Lote 1	Lote 2
AFUF	1,05	1,11
AVUF	3,11	3,37
AN	5,69	5,43
AI	1,87	2,55
B-0	1,45	1,11

Os resultados apresentaram pequena variação no teor de umidade, mesmo levando em consideração que a empresa fabricante dos blocos de concreto para pavimentação recebe quase que diariamente novos lotes de agregados sem controle de umidade, e ainda possui seus depósitos a céu aberto. Pela variação do teor de umidade ter se mostrado pequena, fica mais fácil para o operador da empresa manter um padrão na relação a/c. Porém, novos lotes podem conter teor alto de umidade, isso implica num controle visual mais cuidadoso ao iniciar a produção dos blocos de concreto. Atualmente na empresa é praticado o “ensaio da pelota”, para verificar se teor de umidade no concreto para a produção dos blocos está de acordo com a necessidade.

#### 4.1.1.2 Massa Específica e Massa Unitária dos agregados miúdos e dos resíduos de fundição.

A Tabela 8 mostra o valor das massas específicas dos resíduos de fundição (AFUF e AVUF), e da combinação entre eles, e dos demais agregados miúdos utilizados na produção dos blocos de concreto para pavimentação, areia natural (AN) e areia industrial (AI). Nota-se que há uma diferença considerável entre as massas específicas da AN e da sua substituta neste trabalho, a combinação da AFUF e AVUF, que ficou em torno de 13%, indicando que o volume ocupado pela combinação dos resíduos é maior em relação à areia natural para uma mesma massa de agregados.

**Tabela 8 - Massa específica e massa unitária dos agregados miúdos e dos resíduos**

Agregados	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )
AFUF	2,5	1,4
AVUF	2,0	1,2
AFUF/AVUF	2,2	1,3
AN	2,5	1,5
AI	2,6	1,7

Para melhor visualizar a diferença entre as massas específicas, foi realizada a comparação através do volume para o consumo por m<sup>3</sup> desses agregados, necessários para

produzir o equivalente a 1 m<sup>2</sup> de blocos de concreto intertravado tipo Unistein 8, conforme mostra a Tabela 9.

**Tabela 9 - Massa necessária de AN e da combinação da AFUF e AVUF para produzir 1m<sup>2</sup> de blocos de concreto tipo Unistein 8**

Volume (m <sup>3</sup> )	Agregado	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa necessária (Kg)
0,060	Areia Natural	2,49	149,40
0,060	AFUF/AVUF	2,21	132,60

Através da Tabela 9, nota-se que para o mesmo volume dos resíduos em relação a AN, a massa é menor, resultando numa diferença de 11% da quantidade necessária entre ambos, mostrando que não seria o ideal fazer a simples substituição por massa da AN pelos resíduos. Ao colocar a mesma massa da combinação da AFUF e AVUF em substituição da AN, o resultado seria um volume de concreto maior que o necessário para produzir uma quantidade definida de blocos de concreto. Isso significa que em uma “massada” de concreto prevista para resultar em 1 m<sup>2</sup> de blocos, resultaria em aproximadamente 1,13 m<sup>2</sup>, sendo 13% a mais do que o previsto, ou seja, resultaria num número maior de blocos, onde esses possivelmente teriam um percentual menor de cimento, pois a relação cimento agregado foi alterada, havendo uma diluição de cimento entre o total de blocos. Essa diluição poderia resultar numa resistência mecânica menor. Visto isso, pode-se afirmar que o ideal em caso de substituição entre esses dois agregados, seria realizar a substituição por volume, e não por massa.

#### 4.1.1.3 Granulometria

Neste item, serão apresentados os resultados da composição granulométrica dos agregados miúdos, da combinação da AFUF e AVUF e do agregado graúdo.

##### 4.1.1.3.1 Areia Natural (AN)

O resultado do ensaio da composição granulométrica do agregado miúdo areia natural (AN) é mostrado na Tabela 10. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Já a curva granulométrica, juntamente com os limites de distribuição granulométrica apresentados na NBR 7211 (ABNT, 2009) é mostrado na Figura 15.



Tabela 10 - Distribuição granulométrica da areia natural (AN).

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
4,8	0	0
2,4	1	1
1,2	6	7
0,6	15	22
0,3	46	68
0,15	29	97
<0,15	3	100
Dimensão máxima característica (mm)		2,4 mm
Módulo de Finura		1,9

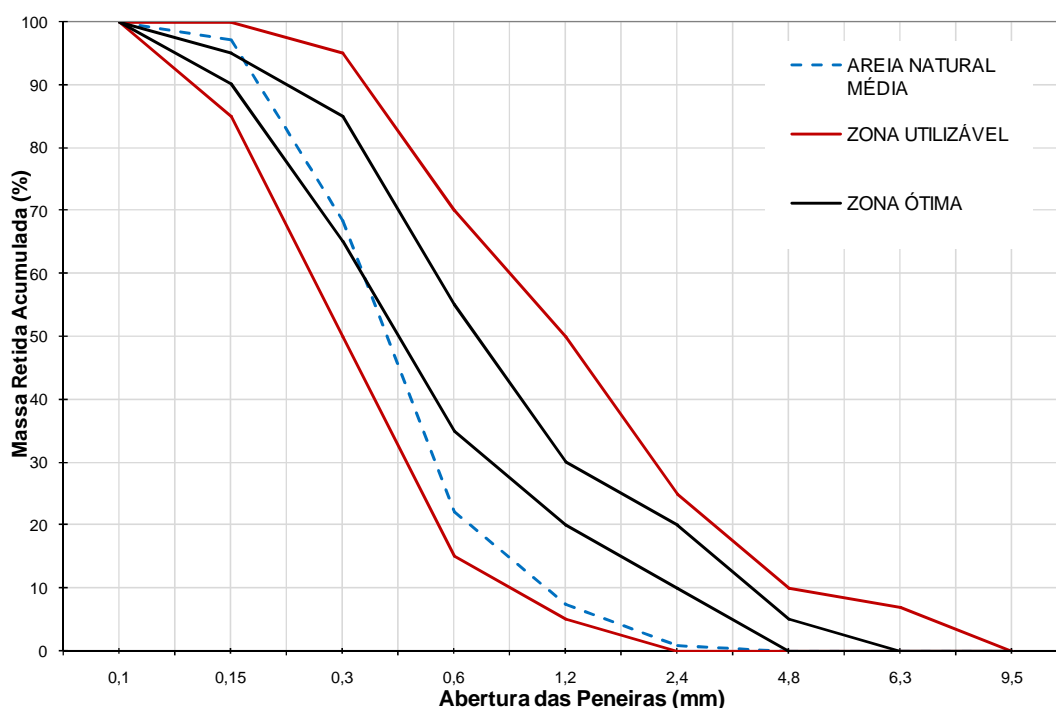


Figura 15 - Granulometria do agregado miúdo – areia natural (AN).

Pelo gráfico da curva granulométrica, observa-se que a areia natural cuja granulometria com dimensão máxima característica de 2,4 mm e módulo de finura de 1,9 foi classificada como média, está classificada dentro da zona utilizável, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009). Nota-se ainda, que entre as peneiras 0,1 mm e 0,3 mm, a curva está dentro da zona ótima. Os valores encontrados para o módulo de finura e dimensão máxima característica da areia natural são próximos aos encontrados por Pettermann (2006) e Franco (2011) em seu estudo.

#### 4.1.1.3.2 Areia Fenólica Usada de Fundação (AFUF)

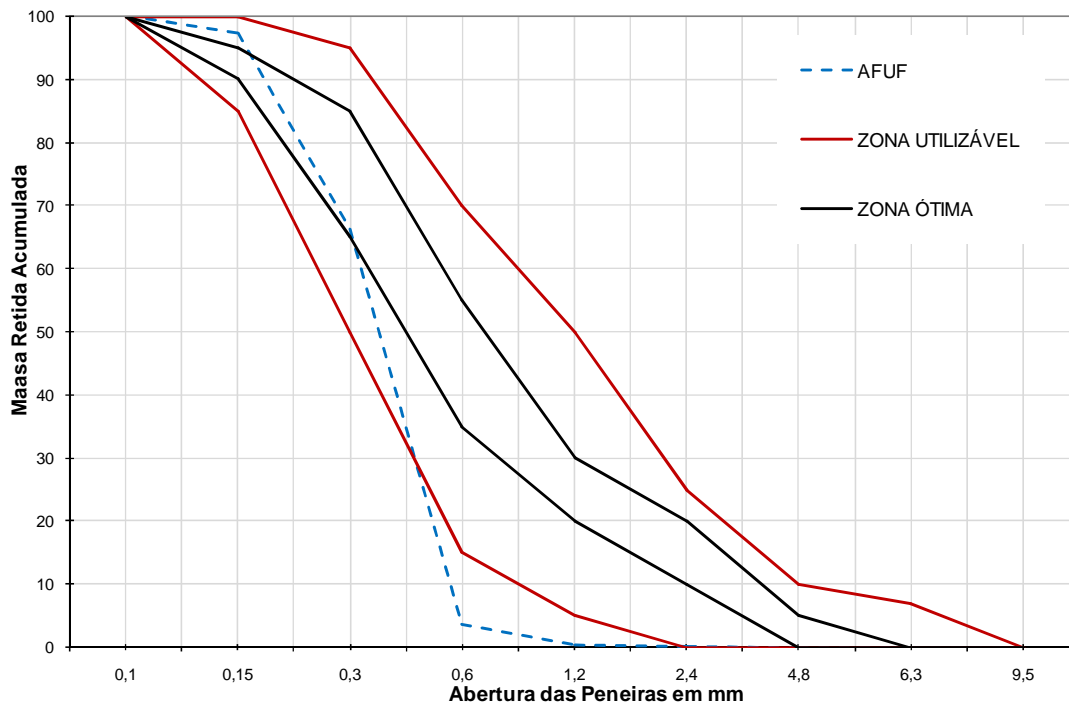
O resultado da composição granulométrica do resíduo areia fenólica usada de fundição (AFUF) utilizada neste trabalho é apresentado Tabela 11.

**Tabela 11 - Distribuição granulométrica da areia fenólica usada de fundição (AFUF).**

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
4,8	0	0
2,4	0	0
1,2	0	0
0,6	3	4
0,3	63	66
0,15	31	97
<0,15	3	100
Dimensão máxima característica (mm)		1,2 mm
Módulo de Finura		1,7

A distribuição granulométrica da AFUF mostra que o seu módulo de finura é menor do que a AN, o que já era esperado, devido a granulometria padrão da areia média ser superior em relação a areia natural de granulometria fina, que é similar a areia base que constitui a areia fenólica. Já a dimensão máxima característica da AFUF é a mesma da AN. Estes valores encontrados estão em conformidade com a NBR 7211 (2009).

A curva granulométrica dessa areia de fundição é apresentada na Figura 16. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

**Figura 16 - Granulometria da areia fenólica usada de fundição (AFUF).**

Na curva granulométrica da AFUF, nota-se que o maior percentual de retenção está localizado entre as peneiras com abertura de 0,30 mm e 0,15 mm, representando mais de 94% da retenção em peso.

#### 4.1.1.3.3 Areia Verde Usada de Fundição (AVUF)

O resultado da composição granulométrica do resíduo areia verde usada de fundição (AFUF) utilizada neste trabalho é apresentado na Tabela 12. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

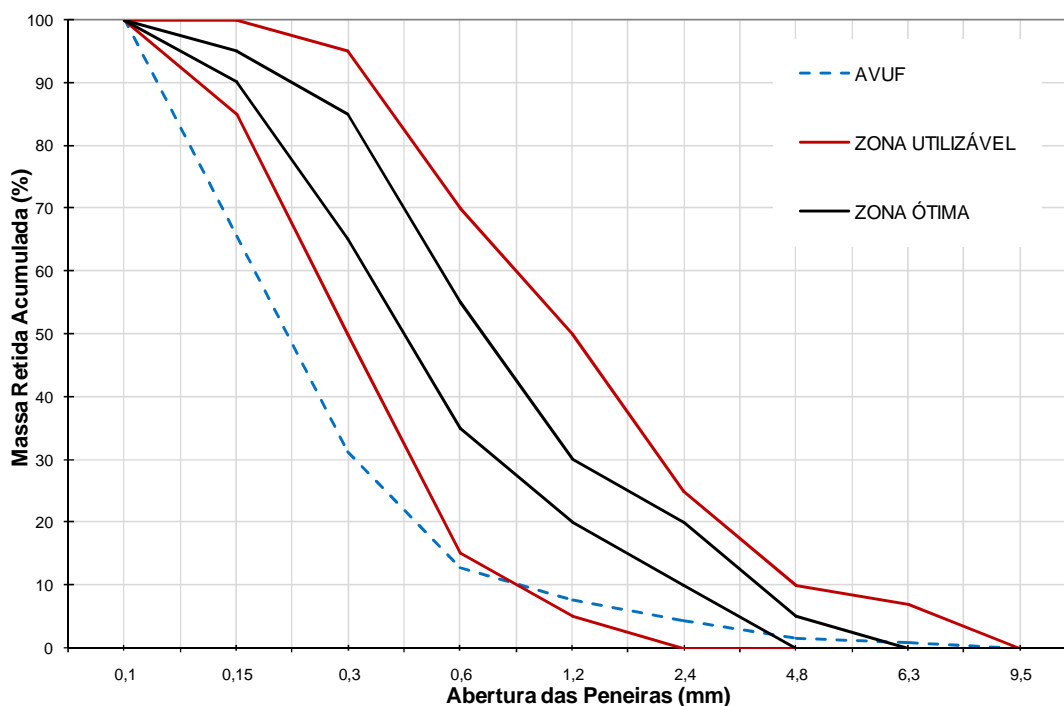
**Tabela 12 - Distribuição granulométrica da areia verde usada de fundição (AVUF).**

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
4,8	1	1
2,4	3	4
1,2	4	8
0,6	5	13
0,3	18	31
0,15	34	66
<0,15	34	100
Dimensão máxima característica (mm)		2,4 mm
Módulo de Finura		1,2

A distribuição granulométrica da AVUF mostra que o seu módulo de finura é menor do que a AN e que da AFUF. Este resultado é menor do que o limite mínimo de 1,55 para o módulo de finura da zona utilizável inferior, que varia de 1,55 a 2,20 (NBR 7211, 2009).

Nota-se que o maior percentual de retenção ficou no fundo do conjunto de peneiras (passante na peneira de 0,15 mm).

A curva granulométrica da AVUF é representada na Figura 17.



**Figura 17 - Granulometria da areia verde usada de fundição (AVUF).**

A curva granulométrica da AVUF mostra que grande parte da amostra ficou retida na peneira de 0,15 mm e no fundo do conjunto de peneiras.

#### 4.1.1.3.4 Co-produto

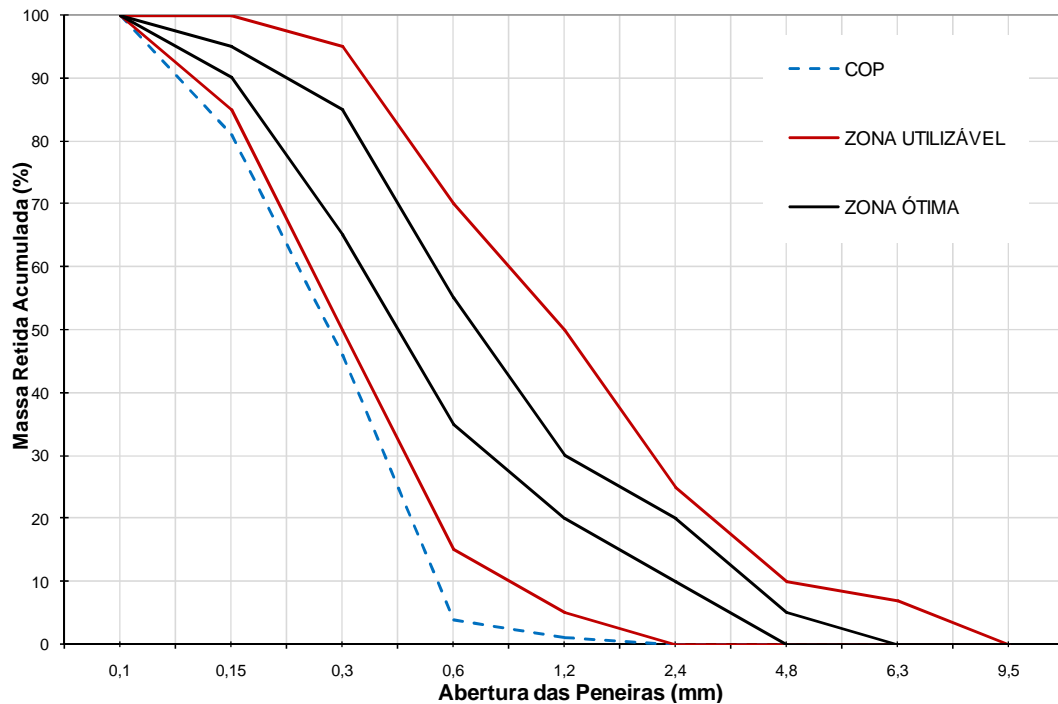
O resultado da composição granulométrica do co-produto que se originou através da mistura de dois resíduos de fundição e que foi utilizada neste trabalho é apresentado na Tabela 13. Da mesma forma que os demais agregados, esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

**Tabela 13 - Distribuição granulométrica da combinação da AFUF e AVUF.**

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
4,8	0	0
2,4	0	0
1,2	1	1
0,6	3	4
0,3	42	46
0,15	35	81
<0,15	19	100
Dimensão máxima característica (mm)		1,2 mm
Módulo de Finura		1,3

A distribuição granulométrica da combinação entre a AFUF e a AVUF mostra que o módulo de finura encontrado, assim como o da AVUF quando individual, é menor do que o limite mínimo de 1,55 para o módulo de finura da zona utilizável inferior, que varia de 1,55 a 2,20 (NBR 7211, 2009). Segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2005), materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas pela norma, podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

A curva granulométrica da combinação entre a AFUF e a AVUF é representada na Figura 18.

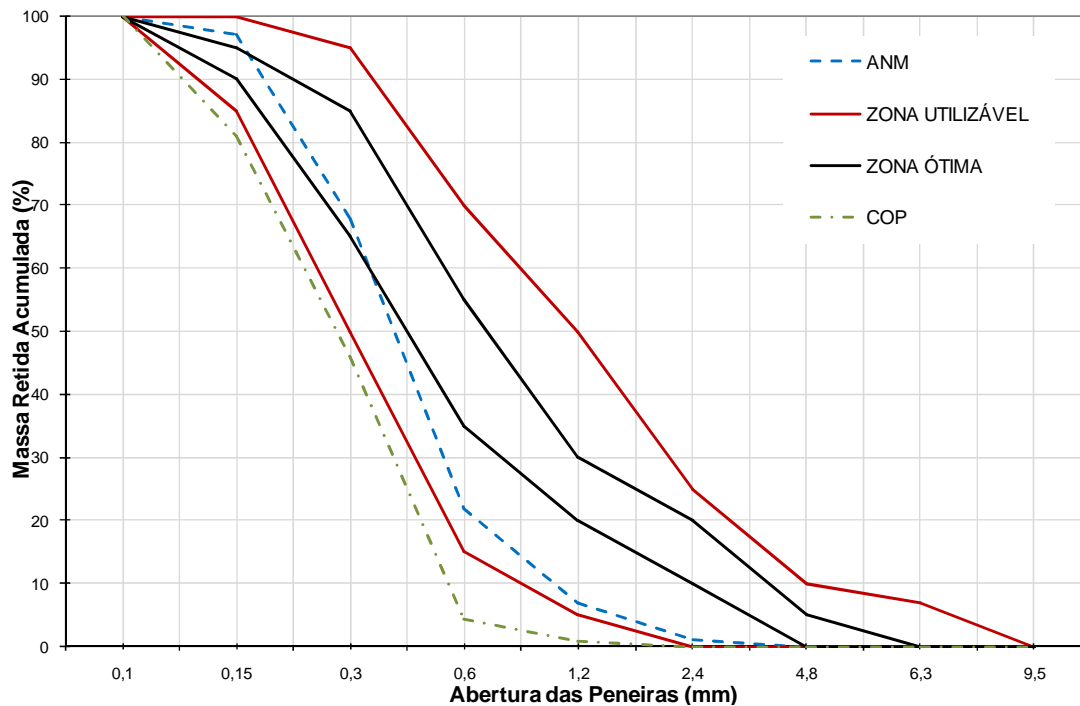


**Figura 18 - Granulometria da combinação entre a AFUF e a AVUF.**

O gráfico da curva granulométrica ilustra a curva de retenção do co-produto, salientando que o maior percentual de material ficou retido nas peneiras de 0,3 mm e 0,15 mm de abertura e quase todo o restante ficou no fundo. A curva também mostra que da combinação entre a AFUF e a AVUF, por ser muito fina, ficou fora da zona utilizável para agregado miúdo. O excesso de finos pode prejudicar o adensamento do concreto para blocos de pavimentação.

#### ***4.1.1.3.5 Combinação entre a AFUF e a AVUF X Areia Natural***

A Figura 19 apresenta de maneira comparativa as curvas granulométricas da AN e da combinação entre a AFUF e a AVUF.



**Figura 19 - Comparativo entre a granulometria da combinação entre a AFUF e a AVUF x AN.**

A Figura 19 mostra que a curva granulométrica da combinação entre a AFUF e a AVUF ficou fora da zona utilizável, apresentando uma granulometria mais fina, porém nem tão distante da curva da areia natural, em torno de 20% mais fino, na qual a combinação entre os resíduos será o substituto parcial no concreto para os blocos de pavimentação produzidos para este trabalho. Conforme citado anteriormente, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2005), materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas pela norma, podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

#### **4.1.1.3.6 Areia Industrial (AI)**

O resultado da composição granulométrica da areia industrial (AI) utilizada neste trabalho é apresentado na Tabela 14. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 14 - Distribuição granulométrica da AI.

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
4,8	0	0
2,4	25	25
1,2	26	51
0,6	14	65
0,3	10	75
0,15	7	82
<0,15	18	100
Dimensão máxima característica (mm)		2,4 mm
Módulo de Finura		3,0

A distribuição granulométrica da AI mostra que o seu módulo de finura de 3,0 está muito próximo da zona ótima que varia de 2,20 até 2,90, assim o resultado encontrado está dentro da zona utilizável superior, que varia de 2,90 a 3,50 (NBR 7211, 2009).

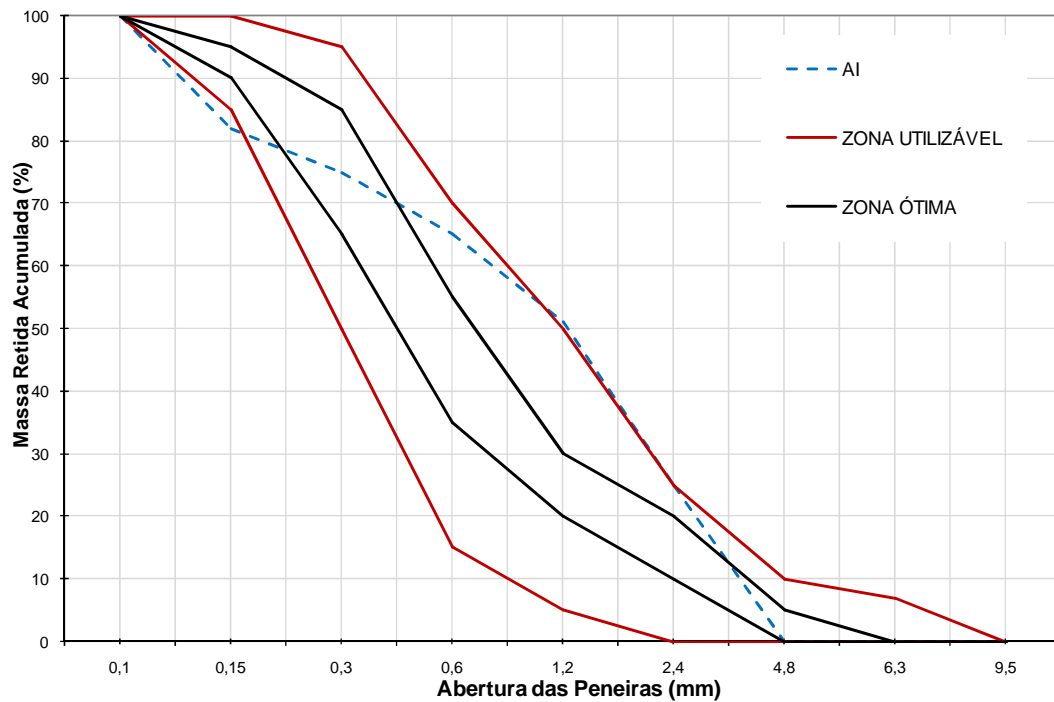


Figura 20 - Granulometria da areia industrial (AI).

Nota-se na curva granulométrica da AI, Figura 20, que os maiores percentuais de retenção ficaram nas peneiras com abertura de malha 2,4 e 1,2, após estes, o maior percentual ficou retido no fundo (em torno de 18%), indicando uma grande presença de material muito fino.

#### 4.1.1.3.7 Brita Zero (B-0)

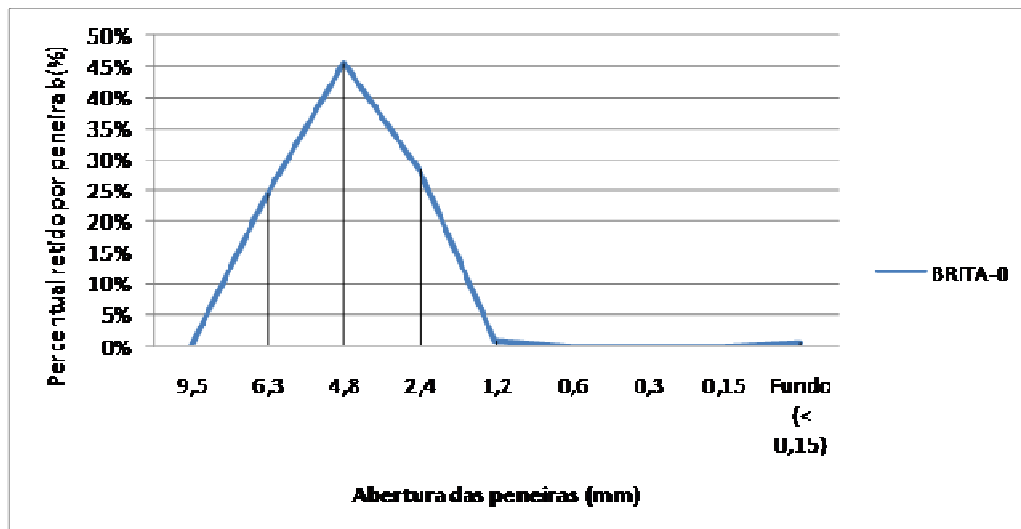
O resultado do ensaio de granulometria da B-0 utilizada neste trabalho foi realizado baseado na NBR 7211 (ABNT, 2009), e é mostrado através da Tabela 15.

**Tabela 15 - Distribuição granulométrica da B-0.**

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
9,5	0	0
6,3	24	24
4,8	46	70
2,4	28	98
1,2	1	99
0,6	0	99
0,3	0	99
0,15	0	99
<0,15	1	100
Dimensão máxima característica (mm)		6,3 mm
Módulo de Finura		5,9

Nota-se pela dimensão máxima característica que, como já é sabido, a B-0 não é considerada um agregado miúdo, e alguns autores não a classificam nem como agregado graúdo, ficando numa faixa intermediária de agregados.

Pela Figura 21 podemos verificar a curva granulométrica da B-0.



**Figura 21 - Curva granulométrica da B-0**

Percebe-se que em torno de 25% do material ficou retido na peneira com abertura de 6,3 mm e a maior parte, 45% do material, ficou retido na peneira com abertura de 4,8 mm, distinguindo o material conforme a classificação para agregados miúdos e graúdos da NBR 7211 (ABNT, 2009), que cita que o agregado graúdo deve ficar totalmente retido na peneira com abertura de 4,75 mm. Nesse ensaio verificou-se também que em torno de 28% do volume



da B-0 utilizada nesse trabalho é passante na peneira de 4,75 mm, ou seja, o material possui parte de sua granulometria compatível com a granulometria de agregado miúdo e que também poderia configurar melhor qualidade estética aos blocos de concreto para pavimentação.

#### 4.1.2 Caracterização Química

Neste item serão apresentados os resultados e discussões dos ensaios de caracterização química dos agregados e resíduos.

##### 4.1.2.1 Perda ao Fogo

O resultado do ensaio de perda ao fogo dos resíduos de fundição e das areias natural e industrial utilizadas no presente trabalho estão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16 - Resultado de perda ao fogo dos resíduos e agregados**

Material	Perda ao Fogo (%)
AFUF/AVUF	3,86
AFUF	1,82
AVUF	7,96
AN	0,60
AI	0,40

Através dos resultados apresentados para perda ao fogo, nota-se que, conforme já era esperado, as areias usadas de fundição apresentaram maiores percentuais de perda de matéria, principalmente a AVUF, sugerindo perda de umidade, a decomposição térmica (queima de matéria orgânica) e decomposição de carbonatos em óxidos e CO<sub>2</sub> a temperaturas altas, assim como a desidratação e desidroxilação da argila de bentonita (CARNIN et al, 2012). A influência maior ou menor de algum destes fenômenos necessitaria de uma análise via a técnica de termogravimetria.

Para a AFUF obteve-se o valor de 1,82% de perda de matéria orgânica, principalmente resina fenólica que é adicionada em um percentual de 2,5% na preparação da areia nova. Esse resultado sugere que parte dos compostos a base de fenol presentes nos moldes são transferidos para a atmosfera através de sua volatilização após o aquecimento no processo de fundição, neste caso na região de interface do molde com o metal líquido. Aditivos orgânicos sofrem uma decomposição térmica no interior dos moldes, resultando na formação de compostos voláteis (DUNGAN e REEVES, 2007 apud CARNIN et al, 2012). Nunes (2013) obteve em análise para seu trabalho um valor muito próximo, com percentual de 1,7% de perda ao fogo para a AFUF, gerada pela mesma fonte, porém em período diferente.

Já a combinação entre a AFUF e a AVUF teve uma perda de massa média de 3,86%, o que condiz com os resultados encontrados para a AFUF e AVUF, levando em consideração que é composto por 60% e 40% desses resíduos, respectivamente. Essa perda de massa se dá pelos mesmos motivos citados para AVUF e AFUF.

A areia natural de rio e a areia industrial apresentaram 0,6% e 0,4% de perda de massa respectivamente, devido à perda de umidade e algum material orgânico natural que acompanham essas areias desde a sua mineração.

#### 4.1.2.2 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Para o ensaio de FRX foi utilizado como padrão secundário a cinza da casca de arroz (CCA). O ensaio qualitativo de fluorescência de Raios-X para os resíduos de fundição apresentou os resultados conforme mostrado na Tabela 17.

**Tabela 17 – Resultado qualitativo da fluorescência de Raios-X da AFUF e AVUF.**

Análise Qualitativa - FRX		
Elementos	Resíduos	
	AFUF	AVUF
Elemento majoritário	Si	Si
Elementos minoritários	S, P, Al, K e Fe	Fe, Al, K, S, Ca e Ti
Elementos traços	Ti, Zr e Zn	Zr, Mn, Zn e Sr

Como já era esperado, o elemento majoritário nas areias de fundição é o silício, resultado da areia utilizada no processo, embora o Si também esteja presente na argila de bentonita (CARNIN et al, 2012). Os elementos minoritários e traços podem ser oriundos dos compostos utilizados nas formulações das areias (K, Al, e Ca, por exemplo), assim como material residual do processo de vazamento de ferro fundido (Fe, Mn, Al, S, e P, por exemplo) junto aos moldes.

Já os resultados da análise quantitativa da FRX estão apresentados na Tabela 18, onde o resultado é apresentado na forma dos óxidos binários considerados mais estáveis, considerado no equilíbrio termodinâmico, mas possivelmente não verdadeiro para alguns dos compostos. Será apresentado posteriormente resultados de difração de raios-X, na tentativa de melhor avaliar os compostos presentes.

**Tabela 18 - Resultado quantitativo da fluorescência de Raios-X da AFUF e AVUF.**

<b>Análise Quantitativa - FRX</b>		
Elementos	AFUF (%)	AVUF (%)
ZnO	0,004	0,006
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,144	4,644
MnO	0,001	0,034
TiO <sub>2</sub>	0,055	0,590
CaO	0,035	0,635
K <sub>2</sub> O	0,265	0,845
Cl	0,315	0,449
SO <sub>3</sub>	0,589	0,751
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,224	0,084
SiO <sub>2</sub>	98,047	89,171
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,323	2,693
MgO	0,001	0,099

Na análise quantitativa de FRX da AFUF e da AVUF confirma-se a predominância do Si como o principal elemento mineral nessas areias. Na AVUF, devido aos grãos de areia natural terem sido cobertos com bentonita e carvão, a presença dos elementos Al, Ca, Mg e S são maiores em relação aos demais elementos. O alto percentual de ferro na AVUF é devido à incorporação de partículas de ferro fundido durante o processo de fundição. Já a presença dos elementos Ca, Cl, P, e S pode ser devido ao acúmulo de sais presentes na água tratada fornecida pela companhia de água local, como sugere CARNIN et al (2012), e a própria bentonita e o pó de carvão usados na preparação da areia verde.

### **4.1.3 Caracterização Estrutural**

Neste item serão analisados os resultados da difração de raios-X e da microscopia eletrônica de varredura para os agregados e resíduos de fundição.

#### **4.1.3.1 Difração de Raios-X (DRX)**

Neste item são mostrados os resultados da DRX para a AFUF e a AVUF. A Figura 22 apresenta o gráfico da DRX da AFUF.

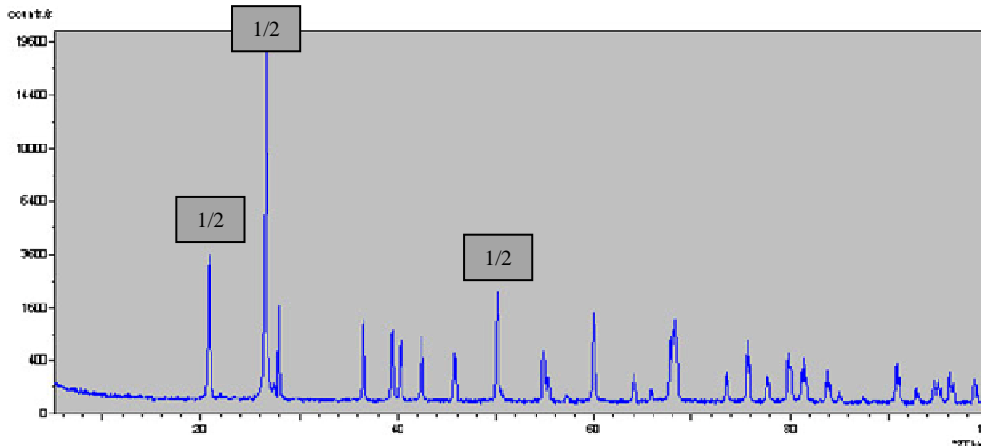


Figura 22 - Difratoograma da amostra de AFUF

Onde:

- 1- Quartz, low ( $\text{SiO}_2$ )
- 2- Quartz, sun ( $\text{SiO}_2$ )

Pelo gráfico da Figura 22, nota-se a maior presença do elemento quartzo (quartz low e quartz syn) nos picos “1” e “2”. Outros elementos não foram significativos a ponto de serem identificados na amostra analisada.

A Figura 23 apresenta o gráfico da DRX da AVUF.

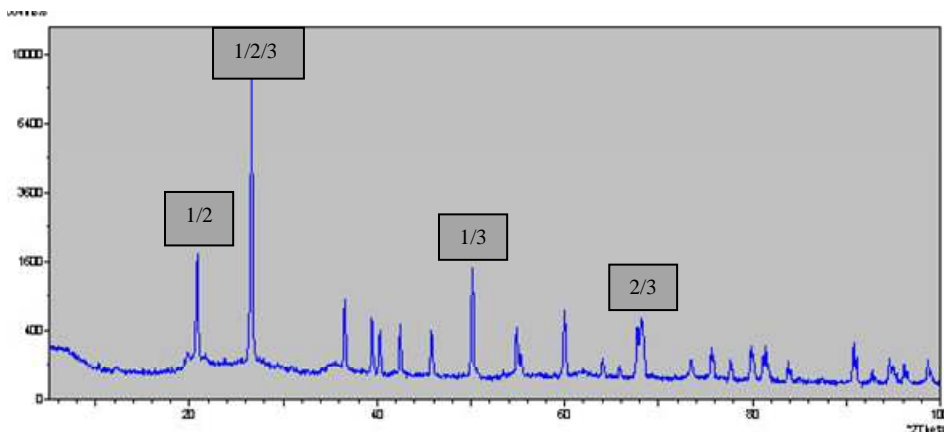


Figura 23 - Difratoograma da amostra de AVUF

Onde:

- 1- Quartz, low ( $\text{SiO}_2$ )
- 2- Quartz, sun ( $\text{SiO}_2$ )
- 3- Silicon oxide ( $\text{SiO}_2$ )

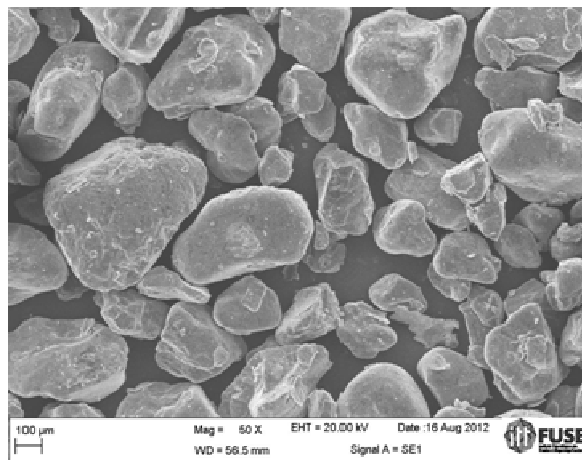
Pelo gráfico da Figura 23, nota-se a maior presença do elemento quartzo (quartz low e quartz syn) nos picos “1” e “2” e óxido de silício no pico “3”. Outros elementos não

foram significativos (composição química) a ponto de serem identificados na amostra analisada. Apesar de análise química via FRX ter identificado  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em 4,64%, compostos de Fe não foram identificados na DRX.

#### 4.1.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Neste item serão apresentados os resultados da análise de MEV dos resíduos de fundição e da areia natural, a fim de comparar a morfologia dos respectivos grãos.

Os grãos da AFUF com aumento de 50X através do MEV podem ser visto na Figura 24.

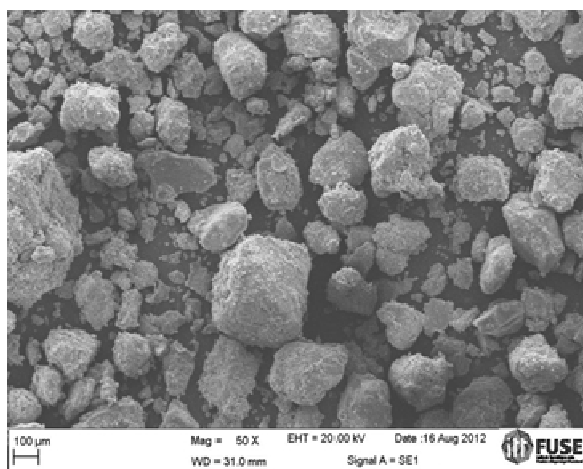


**Figura 24 – Micrografia da AFUF (aumentado em 50x).**

Percebe-se que os grãos da AFUF apresentam alguma presença da camada de resina fenólica em sua superfície, o que pode ser confirmado pelo resultado de perda ao fogo que apresentou uma perda de massa de 1,82%, indicando a queima da resina. A pouca presença de resina em alguns grãos pode ser em razão do aquecimento da interface metal e molde a altas temperaturas, em torno de  $1400^{\circ}\text{C}$ .

Esses grãos podem ser considerados com uma forma sub arredondada (Powers, 1953), o que favorece o empacotamento tanto na mistura com a AVUF quanto posteriormente na produção do concreto para os blocos de pavimentação. De acordo com Fabro et al (2011), os agregados com grãos mais arredondados proporcionam concretos com maior fluidez, melhor coesão e acabamento superficial. Os grãos da AFUV se apresentam em tamanhos diversos, provavelmente originados por ter sido usado em vários ciclos no processo de fabricação dos moldes, onde após desmoldagem, a areia com resina é destorroada e

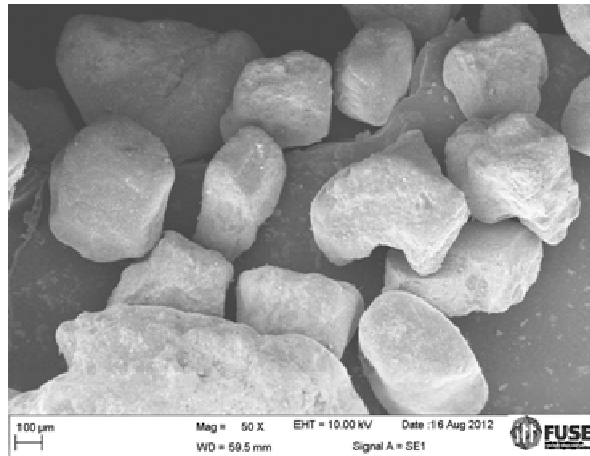
regenerada mecanicamente, e volta como matéria-prima em um novo ciclo. Já na Figura 25, pode-se verificar a micrografia e identificar a morfologia dos grãos da AVUF.



**Figura 25 - Micrografia da AVUF (aumentado em 50x).**

Nota-se pela micrografia da AVUF que seus grãos estão parcialmente cobertos possivelmente com bentonita e carvão e algum material residual do processo de fundição, esse fato está de acordo com o resultado apresentado na análise de perda ao fogo, com 7,96% de perda de massa. Esses grãos apresentam em geral uma morfologia que pode ser considerada como sub angular, de acordo com Powers (1953). Há grãos com diversos tamanhos e fragmentos da própria areia que apresenta uma morfologia angular. Este formato de grãos, em grande volume, pode prejudicar a consistência, a coesão e a textura final do concreto (FABRO et al., 2011). A diferença de tamanho e os fragmentos dos grãos podem ser atribuídos pelo mesmo motivo da AFUF, onde a areia é destorroada e recuperada (separação magnética, peneiramento e resfriamento) e após volta para uma nova etapa de confecção de moldes. Este processo faz com que os grãos entrem em atrito, possibilitando assim a quebra e até a mudança de morfologia.

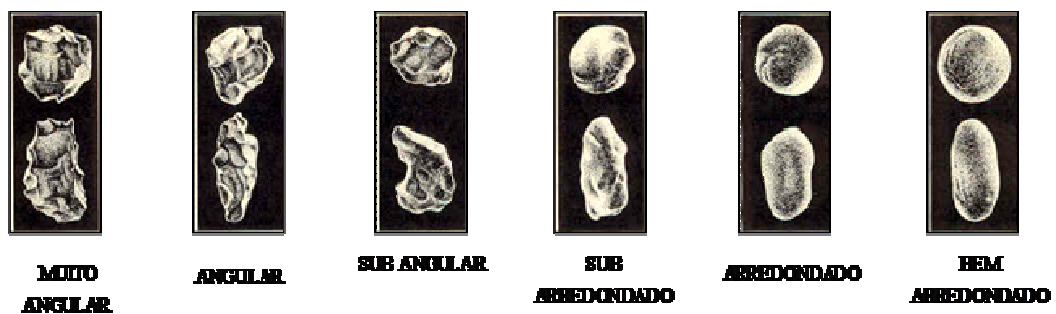
A Figura 26 mostra a micrografia e morfologia dos grãos da AN.



**Figura 26 - Micrografia da AN (aumentado em 50x).**

Os grãos da areia natural foram classificados como sub arredondados, com certa similaridade com a AFUF, o que é benéfico para um melhor empacotamento dos agregados no concreto, podendo proporcionar concretos com maior fluidez, melhor coesão e acabamento superficial (FABRO et al., 2011).

A classificação morfológica dos grãos de resíduos de fundição e da areia natural utilizadas neste trabalho foram determinados através da comparação com os grãos apresentados na Figura 27.



**Figura 27 - Classificação morfológica da areia natural**

Fonte: Powers (1953)

Após a apresentação da caracterização dos resíduos e agregados utilizados neste estudo, o capítulo 4.2 fará uma abordagem sobre os resultados da caracterização dos blocos de concreto produzidos.

## 4.2 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização dos blocos de concreto para pavimentação, nos traços de referência e traços com percentual de substituição do agregado miúdo natural (AN) pela da combinação entre a AFUF e a AVUF.

### 4.2.1 Resistência Mecânica à Compressão

As médias dos resultados de resistência mecânica à compressão dos blocos estudados neste projeto nas idades de 7 dias e 28 dias de cura, bem como os respectivos desvios-padrão e coeficiente de variação, são apresentados na Tabela 19 e na Figura 28 respectivamente. Os dados individuais de cada traço para os blocos de concreto para pavimentação com e sem substituição parcial do agregado miúdo AN pela combinação entre a AFUF e a AVUF constam no apêndice.

**Tabela 19 - Resistência mecânica à compressão média ( $f_{cm}$ ) em MPa dos blocos de concreto para pavimentação nos traços referência e com substituição parcial da AN pela AFUF/AVUF.**

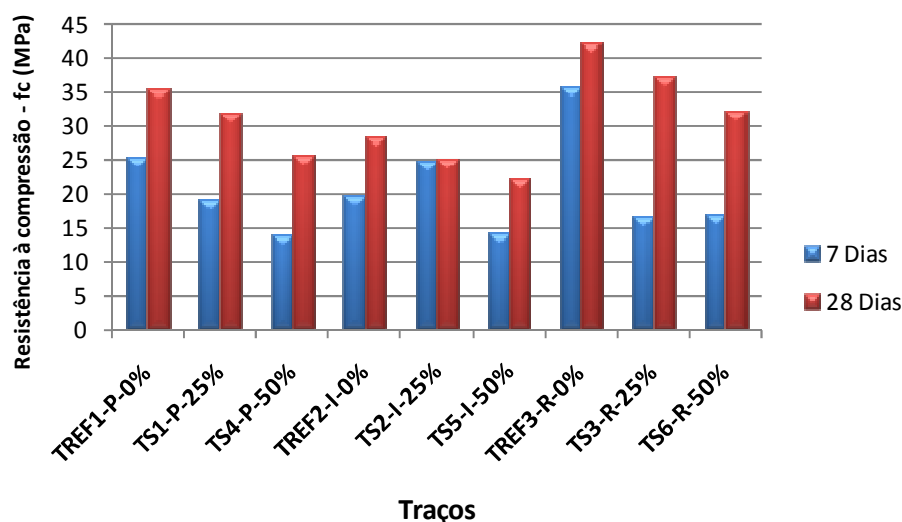
Traços	$f_{cm}$ 7 dias (MPa)	$\sigma$	C.V. (%)	$f_{cm}$ 28 dias (MPa)	$\sigma$	C.V. (%)
TREF1	25,4	2,5	10	35,6	2,3	6
TREF2	19,8	2,2	11	28,4	3,9	14
TREF3	35,6	2,2	6	42,3	1,9	5
TS1	19,1	2,2	11	31,8	4,1	13
TS2	24,9	3,2	13	25,3	2,1	8
TS3	16,7	1,9	12	37,2	4,5	12
TS4	14,0	2,0	15	25,6	3,0	12
TS5	14,1	1,3	10	22,3	2,7	12
TS6	16,7	4,2	25	32,2	5,1	16

Onde:  $\sigma$  = desvio padrão; C.V. = coeficiente de variação

Observa-se que em alguns traços houve uma variação da resistência de até 25% aos 7 dias de cura, enquanto o coeficiente de variação médio ficou em 12,6% e 11% aos 7 e 28 dias de cura respectivamente. Essa variação levou a um desvio padrão médio de 2,4 nos primeiros 7 dias, com exceção para o TS5 que apresentou um baixo desvio-padrão e o TS6, que apresentou o maior desvio-padrão para os blocos ensaiados aos 7 dias de cura, assim como um alto coeficiente de variação, de 25%. Já para os 28 dias de cura, a média do desvio-padrão aumentou para 3,3, principalmente devido aos traços TREF2, TS1 e TS6 que apresentaram os maiores coeficientes de variação.

A Figura 28 apresenta através do gráfico o comportamento das médias de resistência aos 7 e 28 dias de cura dos traços utilizados nesse trabalho.





Onde: P = Pobre; I = Intermediário; R = Rico; 0%, 25% e 50% = teor de AFUF/AVUF.

**Figura 28 - Média da resistência mecânica à compressão dos blocos aos 7 e 28 dias de cura.**

Percebe-se que o crescimento da resistência ocorreu rapidamente já na idade de 7 dias de cura, principalmente nos traços de referência e nos traços de substituição 1 e 2. Isto explica-se basicamente pelo fato de ter sido usado o cimento CPV-ARI, que, conforme citado no 3.1.1, devido as suas características, confere alta resistência inicial aos artefatos de concreto. Já na idade de 28 dias de cura, nota-se o aumento relativo da resistência em quase todos os traços, com exceção do TS2 que praticamente não alterou sua resistência, devido ao processo de hidratação do cimento ao longo do tempo, e com os TREF1, TREF3 e TS3 ultrapassando os 35 MPa, que é a resistência requerida para esse tipo de bloco atender a NBR 9781 (ABNT, 2013).

Nota-se através da Figura 28 que as três classes de traço (pobre, intermediário e rico) apresentaram o mesmo comportamento em relação à resistência, onde há a tendência de queda da resistência com o incremento da combinação entre a AFUF e a AVUF.

Os traços ricos em consumo de cimento foram os que obtiveram as melhores resistências à compressão aos 28 dias de cura. O TS3-R-25% de AFUF/AVUF obteve uma resistência de 37,2 MPa, valor acima do mínimo solicitado pela norma para tráfego de veículos. A possível adoção deste traço com maior consumo de cimento (e conseqüentemente maior custo) para uso comercial pode ser justificada quando se necessita de um pavimento que sofrerá maiores solicitações.

Já os traços intermediários (TREF2, TS2 e TS5) apresentaram resistências menores até mesmo em relação aos traços pobres. Este comportamento de resistências abaixo

de 35 MPa também foi observado em outros cinco lotes de blocos com o traço padrão que foram produzidos pela empresa parceira durante o período deste estudo e analisados no LMC da Unisinos. Para excluir a hipótese de problema operacional, 3 pessoas diferentes realizaram o capeamento e o rompimento desses blocos, porém as médias dos resultados obtidos foram as mesmas, todas em torno de 29 MPa.

Os blocos produzidos para este estudo foram moldados aleatoriamente em dias diferentes, ou seja, em cada dia foram moldados blocos com as três classes de traços e diferentes percentuais da combinação entre a AFUF e a AVUF, o que elimina a hipótese de erro operacional na produção do traço intermediário. Para todos os traços, as pesagens dos agregados e do cimento foram acompanhadas, assim como a mistura, a relação a/c e os parâmetros da vibro-prensa que foram utilizados nos nove traços, assegurando que os blocos foram produzidos de acordo com o especificado para este estudo. Após finalizar cada lote de um mesmo traço, o misturador foi limpo para evitar possível influência de agregados entre um traço e outro. Mesmo com todos os cuidados possíveis na produção, os blocos com traço intermediário apresentaram valores de resistência à compressão que não condizem com os demais traços.

De acordo com Pagnussat (2004), pode haver diferenças significativas na resistência à compressão entre as posições de moldagem dos blocos no maquinário utilizado, em virtude de características como força de compressão, frequência e amplitude de vibração.

A redução da resistência à compressão com o aumento da inclusão da combinação entre a AFUF e a AVUF pode ser atribuída provavelmente ao aumento na área de superfície de partículas finas que levou à redução do gel em água da matriz de cimento, fazendo com que o processo de ligação dos agregados grosseiros e finos não tenha ocorrido corretamente (SINGH e SIDDIQUE, 2012).

A diminuição da resistência dos blocos de concreto com a utilização da mistura AFUF/AVUF pode ser também devido ao aumento da área de superfície de partículas mais finas dos resíduos de fundição, o que pode levar a um enfraquecimento da zona interfacial entre a AFUF/AVUF e a pasta de cimento (CARNIN et al, 2013).

De acordo com Basar e Aksoy (2012) a areia residual de fundição pode ser efetivamente utilizada na produção de concretos como um substituto parcial de agregados finos, sem impactos adversos mecânicos, ambientais e micro-estrutural, no entanto, os autores sugerem que a substituição parcial não deve exceder 20%. Relato semelhante foi dado por

Carnin et al. (2013), onde citaram que a resistência adequada pode ser alcançada utilizando um percentual de areia de fundição apropriado.

Segundo Basar e Aksoy (2012) ao adicionar areia verde de fundição observaram a diminuição da resistência à compressão em amostras de concreto por causa da existência de aglomerante (bentonita) e aditivo (pó de carvão) da areia verde de fundição, que diminui o contato entre a pasta de cimento e o agregado.

Em outro estudo, Singh e Siddique (2012) relataram que o aumento máximo da resistência mecânica à compressão e a tração e o módulo de elasticidade foi observado com a substituição de 15% da areia natural pela areia de fundição, tanto aos 28 dias, quanto aos 91 dias de cura.

A variação apresentada na resistência à compressão neste trabalho pode ser explicada pelo fato que o processo de cura dos blocos não ter sido realizado em câmara úmida como os blocos da empresa parceira, devido à lotação das câmaras, implicando em um processo alternativo nos primeiros dias de cura. Outra possibilidade é o uso de uma relação a/c inadequada, provocada por uma percepção incorreta de umidade, principalmente nos traços com substituição da areia natural pelo co-produto.

De maneira geral, o menor valor da resistência à compressão dos blocos com substituição parcial da areia natural pode estar associada à granulometria mais fina da combinação entre a AFUF e a AVUF, assim como a morfologia mais sub angular, que contribuíram para uma menor compacidade do concreto desses blocos. Outro fato relevante que pode ser observado é que a bentonita presente na AVUF é mais higroscópica que a areia natural, absorvendo mais água no preparo do concreto, dificultando o empacotamento ideal entre o aglomerante e os demais agregados.

Fazendo uma análise comparativa com outros trabalhos utilizando outros resíduos, os valores encontrados para a resistência à compressão aos 28 dias para o traço com 25% de substituição, que é igual a 31,8 MPa e 37,2 MPa para os traços pobre e rico respectivamente, são em torno de 39% maiores que os 26,7 MPa encontrado por Scott Hood (2006) para 25% substituição do agregado miúdo natural por RCD. Ainda em termos de comparação, os valores de resistência à compressão obtidos para os traços pobre e rico com 50% de substituição de areia natural da combinação entre a AFUF e a AVUF são 25,6 MPa e 32,2 MPa respectivamente, valores cerca de 34% maiores que o encontrado por Pagnussat (2004) que foi de 24 MPa para 50% de substituição do agregado miúdo natural pela escória

granulada de fundição e em torno de 170% maior que o valor obtido por Scott Hood (2006), que foi de 11,8 MPa, também para 50% de substituição do agregado miúdo natural, porém por RCD. Cabe salientar que os equipamentos utilizados em cada trabalho têm influência direta sobre os resultados de resistência mecânica.

#### 4.2.1.1 Análise de Variância (ANOVA)

As médias dos resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura foram analisadas através da análise de variância (ANOVA) do efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas e das interações entre elas, conforme é apresentado na Tabela 20.

**Tabela 20 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação a resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias**

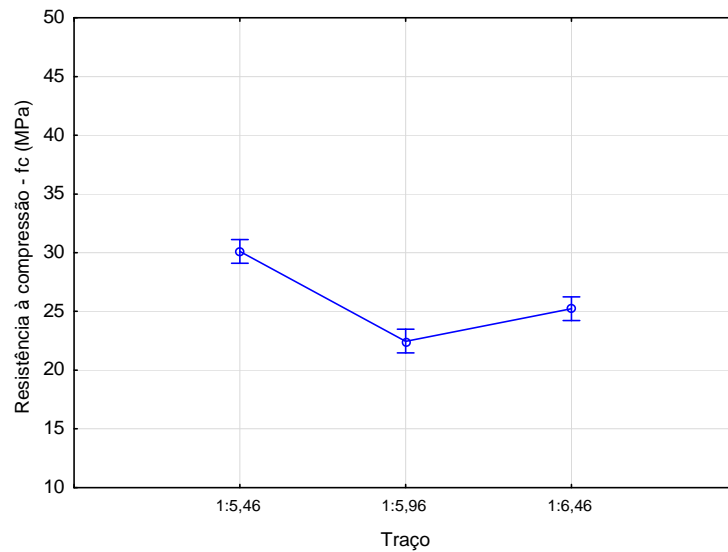
Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância-p	Significativo
TR	2	1080,70	540,35	58,376	0,000000	Sim
RES	2	1941,23	970,61	104,859	0,000000	Sim
IDD	1	2974,65	2974,65	321,363	0,000000	Sim
TR*RES	4	525,61	131,40	14,196	0,000000	Sim
TR*IDD	2	336,83	168,42	18,195	0,000000	Sim
RES*IDD	2	55,69	27,85	3,008	0,054371	Não
TR*RES*IDD	4	381,54	95,38	10,305	0,000001	Sim
Erro	90	833,07	9,26			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ – soma quadrada; MQ = média quadrada; TR = traço; RES = resíduo; IDD = idade.

Com os resultados apresentados na Tabela 20, é possível visualizar estatisticamente a significância do efeito dos fatores estudados sobre a variável resistência à compressão. Todos os fatores isolados e interações, com exceção da interação entre teor de resíduo e idade de ensaio, apresentaram a um nível de confiança de 95%, efeito significativo sobre a variável resistência à compressão, pois apresentam “p” com valores menores que 0,05.

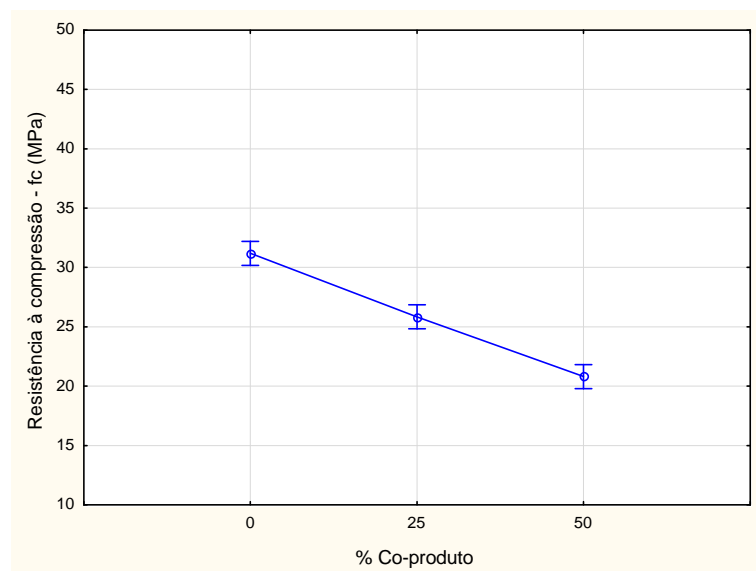
A Figura 29 apresenta o gráfico de médias para o efeito isolado do fator “traço” sobre a resistência à compressão, considerando todos os teores de resíduo e todas as idades.

O traço 1:5,46 (rico), como já era esperado por conter maior percentual de cimento, apresenta a maior resistência à compressão, enquanto com o aumento do teor de agregado a resistência é em média 25% menor no traço 1:5,96 (intermediário) e 16 % menor no traço 1:6,46 (pobre).



**Figura 29 - Efeito isolado da variável “TR” no comportamento da resistência à compressão.**

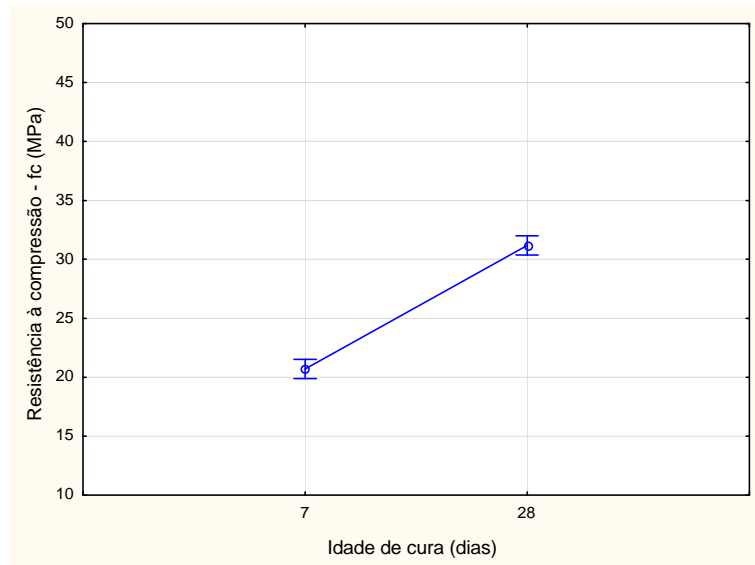
O efeito isolado do fator “resíduo” (uso do co-produto em substituição parcial da areia natural) em relação à resistência à compressão é apresentado no gráfico de médias da Figura 30. A substituição do agregado miúdo areia natural pelo co-produto fez com que os blocos de concreto apresentassem queda na resistência à compressão. Para o percentual de substituição de 25%, essa queda foi de 17%, enquanto que substituindo 50% da areia natural pelo co-produto, a resistência diminuiu cerca de 33% em relação à média dos traços compostos com areia natural.



**Figura 30 - Efeito isolado da variável “RES” no comportamento da resistência à compressão.**

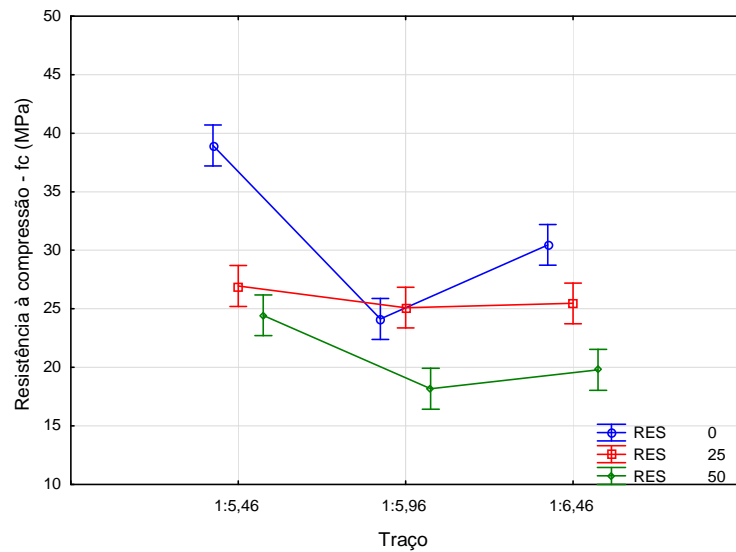
A análise das médias do fator de controle idade de cura apresentado na Figura 31, indica que seu efeito isolado aumenta a resistência à compressão em um percentual de 48% do

7° ao 28° dia de cura, o que já era esperado devido as características dos concretos de aumentarem a resistência com aumento do tempo de cura.



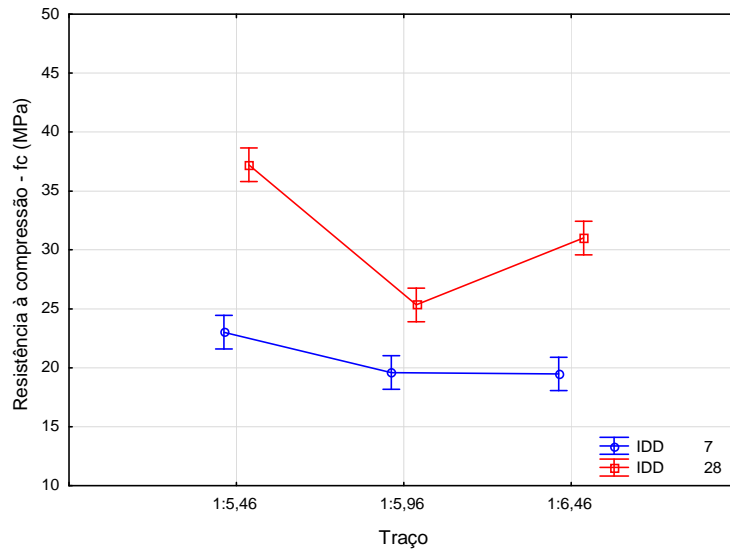
**Figura 31 - Efeito isolado da variável idade de cura no comportamento da resistência à compressão.**

A interação entre o efeito do traço e do teor de resíduo na resistência à compressão pode ser visualizado na Figura 32. Os traços sem o uso do resíduo obtiveram os resultados de resistência maiores que os traços com substituição, com exceção do traço intermediário. Com o uso de 25% da combinação entre a AFUF e a AVUF, o traço rico diminuiu a resistência em torno de 31% e com a substituição de 50% de AN, a resistência diminuiu cerca de 37%. Já para os traços intermediários, as diferenças encontradas foram menores. Ao usar 25% da combinação entre a AFUF e a AVUF, a resistência teve um aumento de 4% no traço intermediário, enquanto com 50% de substituição, a resistência diminuiu 25% em relação ao traço referência. No entanto, os traços pobres seguiram uma tendência de diminuição da resistência com o aumento do percentual de substituição. O uso de 25% da combinação entre a AFUF e a AVUF diminuiu em 16% a resistência dos blocos com traço pobre, enquanto ao utilizarmos 50% de substituição, a resistência diminuiu cerca de 35%.



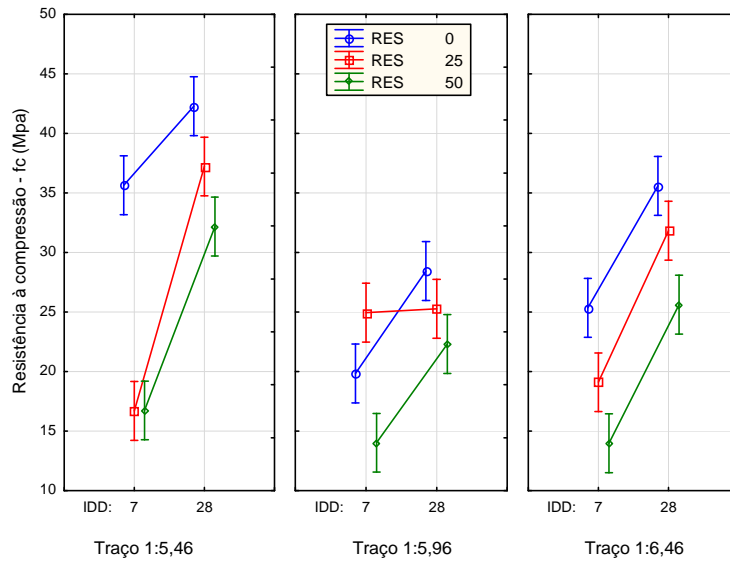
**Figura 32 – Efeito da interação das variáveis “TR” e “RES” no comportamento da resistência à compressão.**

O gráfico de médias da Figura 33 apresenta o efeito das interações entre o teor do traço e a idade de cura sobre a resistência à compressão. Nota-se que o comportamento da resistência aconteceu como era esperado, uma vez que a resistência de um concreto aos 28 dias deverá ser sempre maior que aos 7 dias de cura. Percebe-se que a resistência à compressão no 7º dia de cura é tecnicamente igual para os traços intermediário e pobre. Para o traço rico, obteve-se o maior percentual de aumento da resistência entre o 7º e 28º dia, em torno de 62%. Já o traço intermediário apresentou apenas 29% de aumento da resistência, sendo o traço que menos sofreu alteração, ou seja, não houve correlação significativa nas amostras com traço “intermediário”. Para o traço pobre, a resistência dos blocos aumentou cerca de 59% no período do 7º ao 28º dia de cura.



**Figura 33 – Efeito da interação das variáveis “TR” e “IDD” no comportamento da resistência à compressão.**

A interação de segunda ordem entre o TR, o RES e a IDD é apresentado na Figura 34.



**Figura 34 – Efeito da interação das variáveis “TR” “RES” e “IDD” no comportamento da resistência à compressão.**

Analisando os gráficos de médias da Figura 34, nota-se que a idade de cura mantém o mesmo comportamento nos três traços, apresentando resistência maior aos 28 dias de cura. O comportamento da substituição de areia natural por 25% de resíduo diminui cerca de 11% a resistência no traço rico e no pobre, mas ainda assim, o traço rico apresenta resistência à compressão acima dos 35 MPa requeridos pela NBR 9781 (ABNT, 2013) para



pavimentação de estradas com trânsito de veículos leves e comerciais. Esse mesmo percentual de resíduo adicionado ao traço intermediário apresentou apenas 1% de diferença na resistência aos 7 e 28 dias de cura. Já o acréscimo de 50% de resíduo em substituição a areia, diminuiu a resistência em todos os traços e períodos de cura. No traço rico, essa substituição fez diminuir cerca de 24% a resistência, quando comparada ao mesmo traço, no mesmo período, porém com 100% de areia natural. Mas, comparando com a norma brasileira, o traço rico com 50% de substituição apresentou resistência à compressão apenas 8% menor que o requerido.

Em seu trabalho, Calheiro et al. (2010) utilizaram areia de fundição em substituição parcial a areia natural nos teores de 5 e 10%, onde obtiveram uma redução média de 17% na resistência mecânica à compressão comparado com sua referência.

Já no trabalho desenvolvido por Watanabe et al. (2006), onde utilizaram areia de fundição residual não fenólica em concretos para pavimento, apresentaram resultado satisfatório quando adicionaram 25% dessa areia em substituição da areia comum, resultando em um aumento de 27% da resistência do concreto fabricado por vibro-compressão, em relação ao concreto sem uso da areia de fundição. Porém, ao produzir blocos com o mesmo traço utilizando somente vibração, os autores obtiveram uma redução de 20% na resistência à compressão.

Após várias pesquisas de diversos autores, percebe-se que a origem das areias de fundição, bem como sua composição, granulometria e parâmetros de moldagem do concreto afetam diretamente os resultados quanto a resistência mecânica à compressão. Isto é confirmado em diferentes pesquisas onde foi utilizado o mesmo percentual de substituição do agregado fino pela areia de fundição e originaram blocos de concreto com resistência acima do requerido pelas normas em alguns trabalhos, enquanto em outros a resistência foi menor que os traços de referência estudados.

As areias residuais variam de fundição para fundição, o que requer um estudo prévio das características de cada areia antes da sua utilização parcial ou total na produção de concretos.

#### **4.2.2 Resistência ao Desgaste por Abrasão**

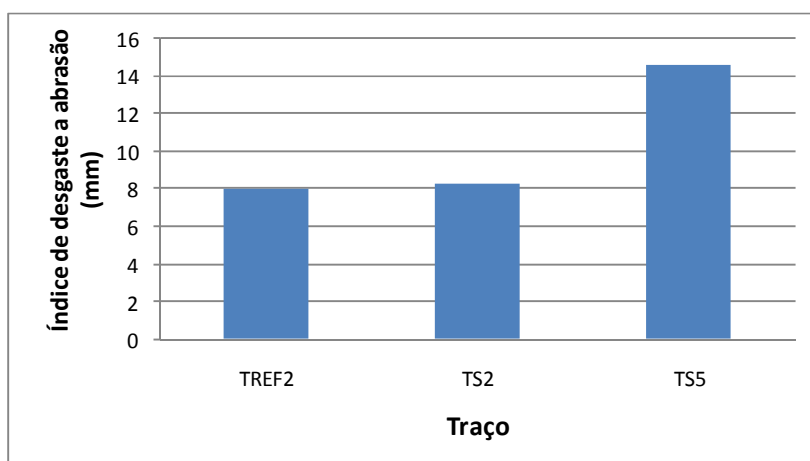
A Tabela 21 mostra os resultados do ensaio de resistência ao desgaste por abrasão, cujo procedimento foi descrito no item 3.3.4. Devido ao alto custo deste ensaio, foram ensaiados apenas os blocos de concreto para pavimentação com o traço “intermediário”, que é

o mesmo traço utilizado pela empresa fabricante de artefatos de concreto e parceira deste trabalho. Os traços ensaiados foram o traço intermediário de referência (TREF2), traço intermediário com substituição de 25% da areia natural (AN) pela combinação AFUF/AVUF (TS2) e o traço intermediário com substituição de 50% da AN.

**Tabela 21 - Índice médio de desgaste por abrasão dos blocos de concreto para pavimentação.**

Traços	CP	Índice de desgaste (mm)		Variação em relação ao referência (%)
		Individual	Médio	
TREF2	1	8,30	8,04	0
	2	7,79		
TS2	1	7,30	8,32	3
	2	9,35		
TS5	1	14,69	14,60	82
	2	14,51		

Conforme apresentado na Tabela 21, o resultado do ensaio mostrou que o TS2 (traço com substituição de 25% de AN da combinação entre a AFUF e a AVUF) teve uma pequena variação, em torno de 3% no índice de desgaste médio em relação ao traço de referência, ou seja, esse percentual de substituição praticamente não interferiu no desgaste por abrasão, o que tecnicamente não é significativo. Já o traço com substituição de 50% de AN teve uma grande variação, em torno de 82%, em relação ao traço referência, indicando grande interferência da combinação entre a AFUF e a AVUF nessa característica. O TS5 obteve os altos percentuais de 17,44% no índice de vazios e 8,64% de absorção de água, o que levou os blocos com este traço a apresentarem a mais baixa resistência mecânica à compressão e alto índice de desgaste à abrasão. O excesso de poros pode ter contribuído para que o TS5 obtivesse o pior desempenho mecânico de todos os traços ensaiados. A Figura 35 ilustra os resultados alcançados de cada traço para o índice de desgaste por abrasão.



**Figura 35 - Índice de desgaste a abrasão dos blocos de concreto para pavimentação.**

Cabe salientar que ainda nos dias de hoje, não há limites de aceitação para avaliação da resistência ao desgaste por abrasão em blocos de concreto para pavimentação preconizada por normas no Brasil.

#### 4.2.3 Absorção de Água

Os resultados do ensaio realizado de absorção de água para os blocos de concreto para pavimentação são apresentados na Tabela 22. Os dados completos podem ser consultados no apêndice.

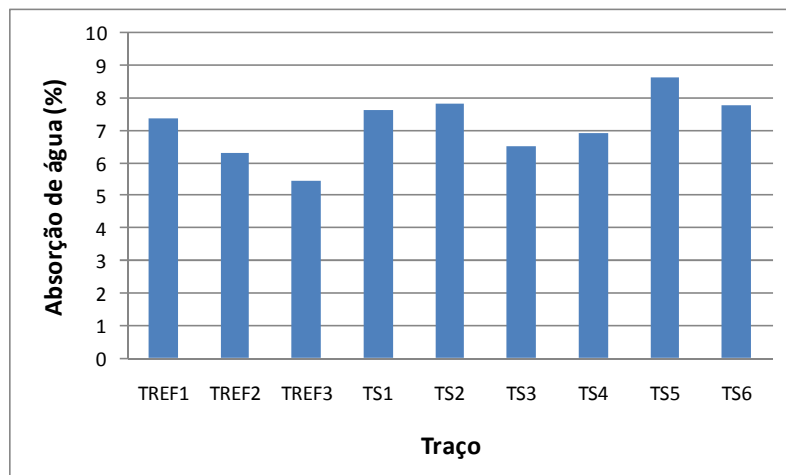
**Tabela 22 - Absorção de água aos 28 dias de idade dos blocos de concreto para pavimentação com traço referência e com substituição parcial da AN pela AFUF/AVUF.**

Traço	Absorção média (%)	$\sigma$	Coef. Variação (%)
TREF1	7,35	0,44	7
TREF2	6,33	0,44	7
TREF3	5,43	0,11	2
TS1	7,61	1,29	17
TS2	7,85	0,59	7
TS3	6,53	0,67	10
TS4	6,90	2,36	34
TS5	8,64	1,14	13
TS6	7,77	1,15	15

Os valores encontrados neste ensaio mostraram que os blocos moldados com um traço forte, com exceção do TS6, têm um percentual de absorção de água menor que traços com menor consumo de cimento. O mesmo acontece com os traços com menor percentual de substituição da AN da combinação entre a AFUF e a AVUF, com exceção do TS1, ou seja, quanto menor o percentual de substituição, menor o valor de absorção de água.

A areia de fundição usada para produção dos moldes é areia de sílica, que é hidrofílica e, conseqüentemente, atrai água para a sua superfície (WINKLER e BOL'SHAKOV, 2000). A presença de resina (AFUF), bentonita e carvão (AVUF) podem ser responsáveis pela maior absorção de água com o aumento do teor de areia de fundição no concreto. A absorção de água por capilaridade aumenta quando a areia normal é substituída por uma quantidade crescente de resíduos de areia de fundição (KHATIB et al., 2013).

Para melhor visualizar os resultados deste ensaio, os valores encontrados estão ilustrados na Figura 36.



**Figura 36 - Absorção de água dos blocos de concreto para pavimentação.**

Nota-se pelo gráfico que os traços não obtiveram valores de absorção de água lineares, porém os traços intermediários e rico em consumo de cimento apresentam a mesma tendência, ou seja, os intermediários absorvem mais água que os ricos.

Basar e Aksoy (2012) encontraram em seu estudo valores similares de absorção de água para os blocos de concreto, onde, de acordo com o aumento do percentual de areia de fundição usada, maior foi o índice de absorção de água.

Khatib et al., (2013) relataram em seu trabalho um aumento na absorção de água por imersão total com o aumento do percentual de substituição da areia natural pela areia de fundição. Esse aumento na absorção de água é uma indicação de um aumento do volume de poros e isto pode ter levado a uma diminuição da resistência à compressão dos blocos estudados, fato também encontrado pelos autores em sua pesquisa.

#### 4.2.3.1 Análise de Variância (ANOVA)

Os resultados de absorção de água foram analisados através da análise de variância (ANOVA) do efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas e das interações entre elas, conforme é apresentado na Tabela 23.

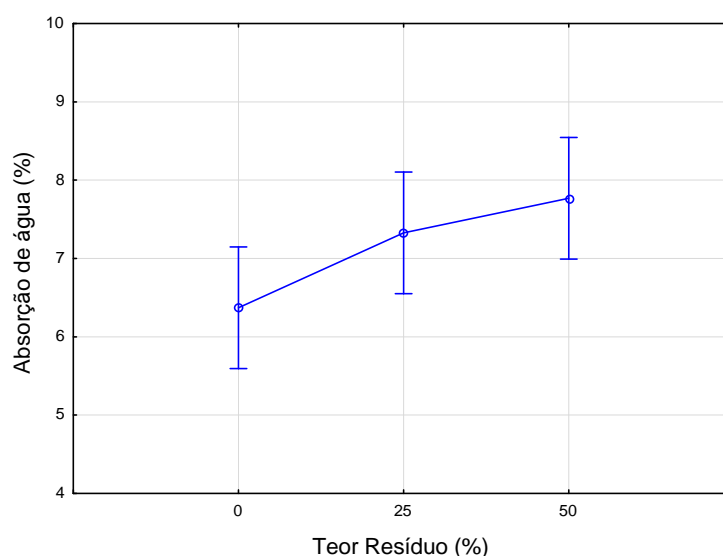
**Tabela 23 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação ao ensaio de absorção de água.**

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância-p	Significativo
TR	2	5,001	2,500	2,035	0,159666	Não
RES	2	9,194	4,597	3,742	0,043771	Sim
TR*RES	4	7,992	1,998	1,626	0,210994	Não
Erro	18	22,116	1,229			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ – soma quadrada; MQ = média quadrada; TR = traço; RES = resíduo.

Na Tabela 23 é possível verificar a significância e as interações dos fatores estudados em relação à absorção de água. O fator isolado “teor de resíduo”, que é o percentual

de co-produto nos blocos de concreto, foi o único que apresentou efeito significativo sobre a absorção de água a um nível de confiança de 95%. Este fator apresenta valor de “p” menor que o nível de significância que é igual a 0,05. O efeito isolado “traço” e a interação entre “traço\*teor de resíduo” não foram considerados como significativos, pois apresentaram valores de “p” acima de 0,05, como 0,159666 e 0,210994, respectivamente. A Figura 37 apresenta o efeito isolado do percentual de resíduos em relação à absorção de água pelos blocos de concreto.



**Figura 37 - Efeito isolado da variável teor de resíduo no comportamento da absorção de água.**

A substituição da areia natural de rio por 25% e 50% de resíduos de fundição aumenta a absorção de água nos blocos de concreto em 15% e 22%, respectivamente. Os valores médios de absorção encontrados nos blocos de concreto com 0, 25% e 50% da combinação entre a AFUF e a AVUF foram 6,37%, 7,33% e 7,77%, respectivamente. Este aumento na absorção dos blocos era esperado, pois na produção do concreto foi necessário aumentar em média 75% a relação a/c para os traços com 50% de AFUF/AVUF. Segundo Fioriti et al. (2007), com relação a percentuais máximos admitidos para absorção de água, as normas internacionais de blocos para pavimentos citam 6% como valor típico utilizado para este ensaio. Já para a NBR 12118 (ABNT, 2011), o limite máximo de absorção de água é de 10%.

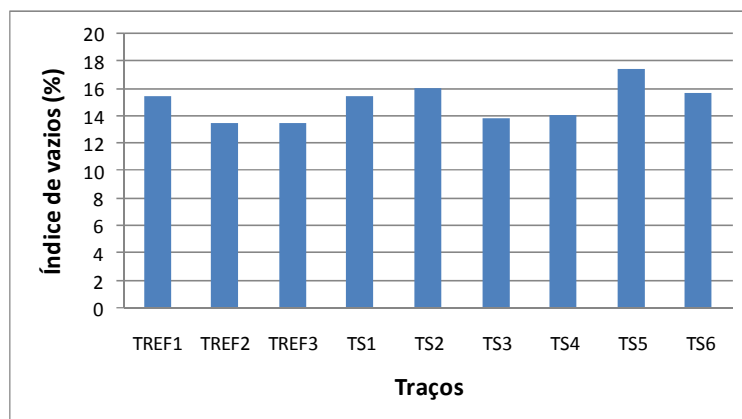
#### 4.2.4 Índice de Vazios

A Tabela 24 mostra os resultados do ensaio de percentual de vazios dos blocos de concreto produzidos com os traços de referência e com os traços de substituição do agregado miúdo (AN) da combinação entre a AFUF e a AVUF. Os dados completos podem ser consultados no apêndice.

**Tabela 24 - Índice de vazios nos blocos de concreto para pavimentação nos traços referência e com percentual de substituição da AN pela AFUF/AVUF.**

Traço	Índice de vazios (%)
TREF1	13,47
TREF2	13,52
TREF3	13,44
TS1	15,45
TS2	16,03
TS3	13,80
TS4	14,08
TS5	17,44
TS6	15,70

A Figura 38 apresenta o resultado da média do índice de vazios para os blocos de concreto ensaiados.



**Figura 38 - Índice de vazios dos blocos de concreto para pavimentação.**

Os valores encontrados para o índice de vazios mostram que os blocos moldados com um traço com menor quantidade de cimento têm certa tendência a apresentar um percentual de absorção de água maior que os traços com mais cimento. Isso pode ser explicado pelo fato do cimento ser mais fino e ocupar melhor os espaços entre todos os agregados, fazendo o trabalho de um filler, preenchendo mais e melhor os espaços vazios. Já os traços com menor percentual de substituição da AN pelo da combinação entre a AFUF e a AVUF tendem a apresentar um menor o índice de vazios, mesmo os resultados sendo muito próximos inclusive do traço de referência. Isso pode ser explicado pelo fato de que a mistura dos resíduos possui sua granulometria mais fina, consumindo mais pasta de cimento, promovendo mais poros na mistura do concreto.

Um alto índice de vazios significa um grande volume de poros e isto pode ser devido à distribuição de tamanho de grão unimodal dos resíduos, o que pode ter conduzido a uma compactação menos ideal e, portanto, maior volume de poros (CARNIN et al., 2013). O índice de vazios, com maior número de poros, pode estar relacionado às variações apresentadas na resistência à compressão.

#### 4.2.4.1 Análise de Variância (ANOVA)

Os resultados do ensaio para o índice de vazios foram analisados através da análise de variância (ANOVA) do efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas e das interações entre elas é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação ao ensaio do índice de vazios.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância-p	Significativo
TR	2	8,197	4,098	0,821	0,455978	Não
RES	2	11,643	5,822	1,166	0,334185	Não
TR*RES	4	24,605	6,151	1,232	0,332559	Não
Erro	18	89,901	4,995			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ – soma quadrada; MQ = média quadrada; TR = traço; RES = teor resíduo

Os dados da Tabela 25 indicam que tanto os resultados de variância dos fatores isolados “traço” e “teor de resíduo” quanto o resultado da interação entre eles, não são significativos a um nível de confiança de 95%. Isso pode ser explicado pela variabilidade dos valores encontrados, que não apresentam linearidade, mas sim uma tendência de menos vazios para os traços com maior percentual de cimento, mesmo assim, nenhum traço afeta significativamente o índice de vazios.

#### 4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para os blocos de concreto

Neste item serão apresentados os resultados da análise de MEV dos blocos de concreto nos traços intermediários e rico em consumo de cimento.

A imagem do MEV para o TREF2 pode ser visto na Figura 39.

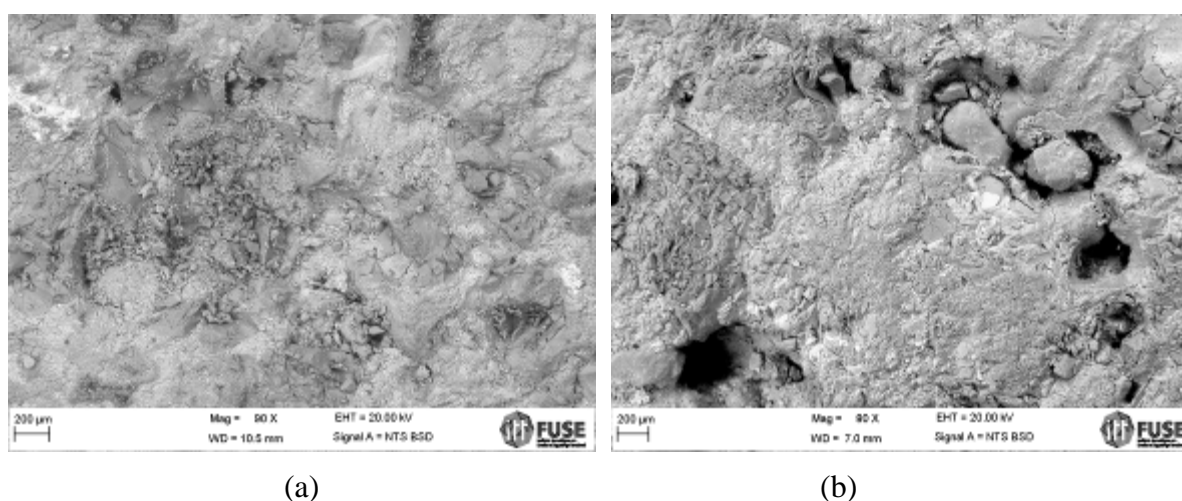
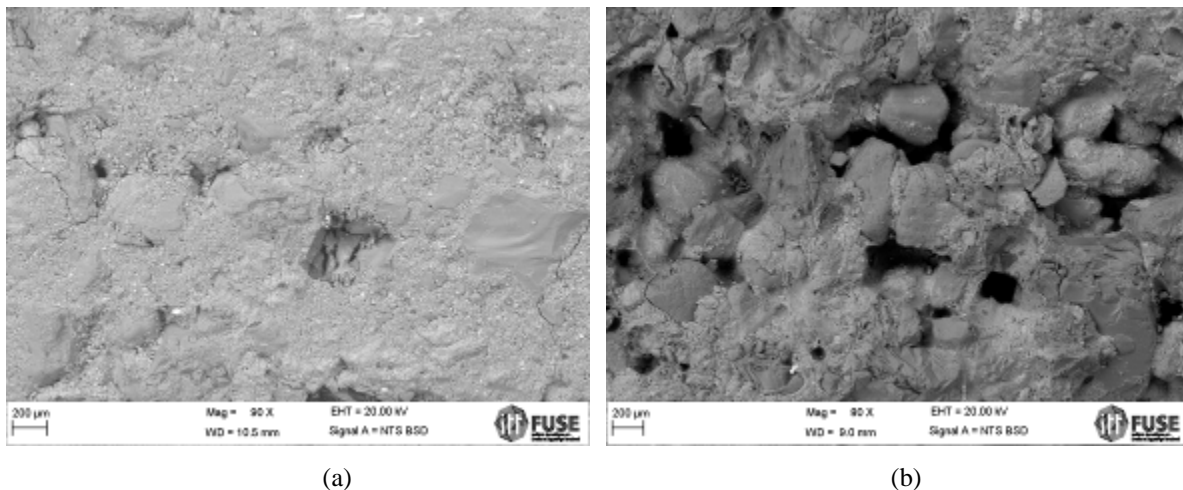


Figura 39 – Micrografia do bloco c/ TREF2 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b) (aumentado 90x).

As imagens através do MEV mostram que o bloco de concreto com o TREF2 possui poros em sua estrutura, assim como algum material mais saliente, indicando um baixo nível de empacotamento dos agregados e aglomerante. Isso pode ter levado os blocos com esse traço a obter os menores valores de resistência à compressão.

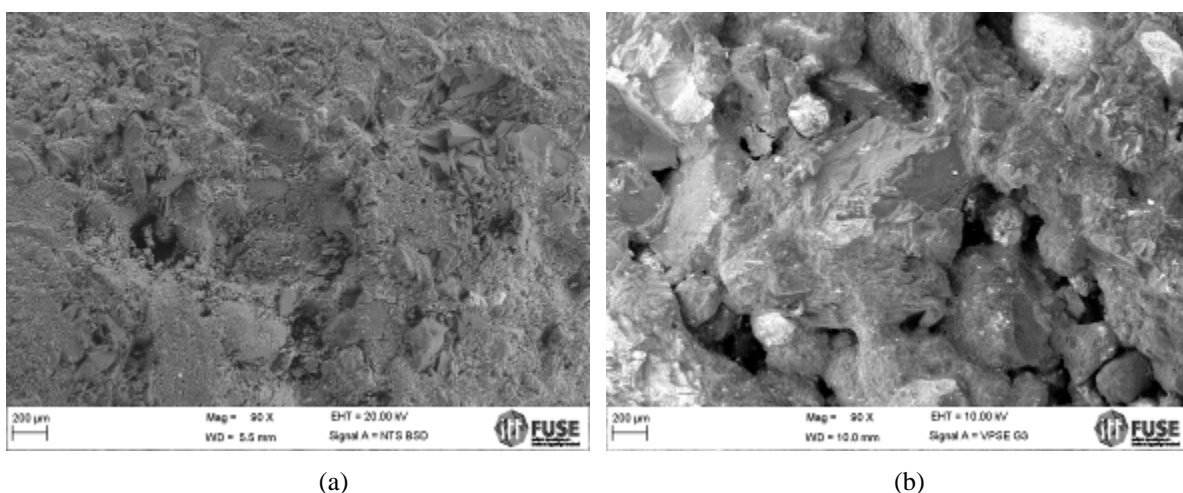
A imagem do MEV para o TS2 pode ser visto na Figura 40.



**Figura 40 - Micrografia do bloco c/ TS2 nas posições vertical (a) e horizontal (b) (aumentado 90x).**

Assim como nos blocos com TREF2, os blocos com 25% de substituição da areia natural pelo COP mostram muitos poros, onde não houve o preenchimento da massa de concreto. O COP, por possuir uma granulometria mais fina, consome mais pasta, possibilitando a formação de poros. Esta situação causou uma maior absorção de água e conseqüentemente uma diminuição da resistência à compressão.

A imagem do MEV para o TS5 pode ser visto na Figura 41.



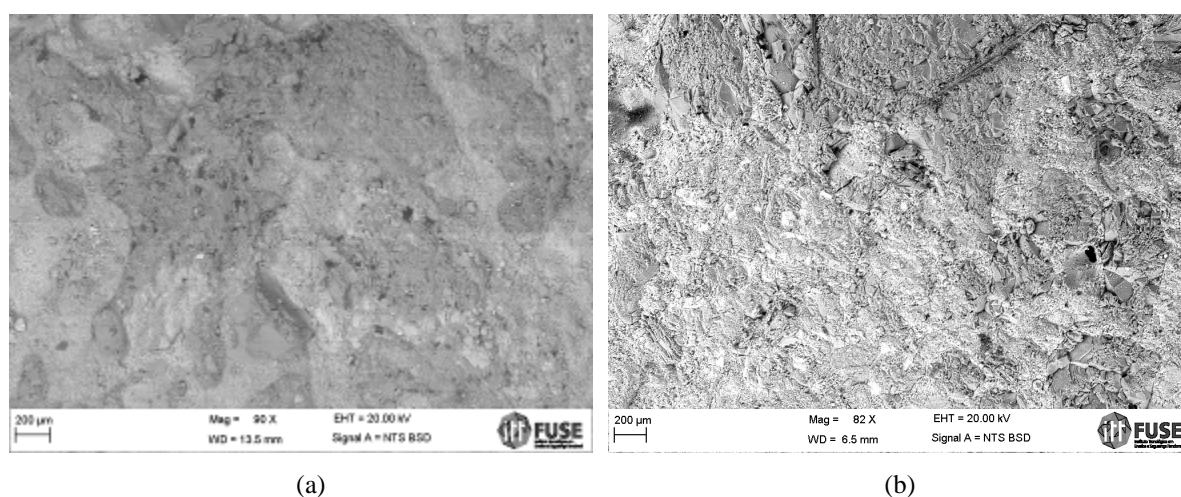
**Figura 41 - Micrografia do bloco c/ TS5 nas posições vertical (a) e horizontal (b) (aumentado 90x).**



A imagem (b) do bloco de concreto mostra visivelmente que não houve uma mistura adequada entre os agregados e o aglomerante, resultando em um concreto bastante poroso. Mesmo que para esse traço tenha sido aumentado a relação a/c, talvez não tenha sido o suficiente para promover o melhor empacotamento dos grãos e adensamento da massa de concreto, o que resultou em blocos com os menores valores de resistência à compressão de todos os traços ensaiados. O teor de COP nos traços com substituição pode ter levado os grãos com presença de bentonita a absorverem um maior percentual de água que os demais agregados, dificultando o adensamento da massa de concreto e provocando o surgimento elevado de poros, também motivados pelo consumo maior de pasta de cimento, devido ao COP possuir granulometria mais fina que a areia natural.

Os blocos que apresentaram melhores resultados no ensaio de resistência à compressão também tiveram sua micrografia analisada, conforme será visto a seguir.

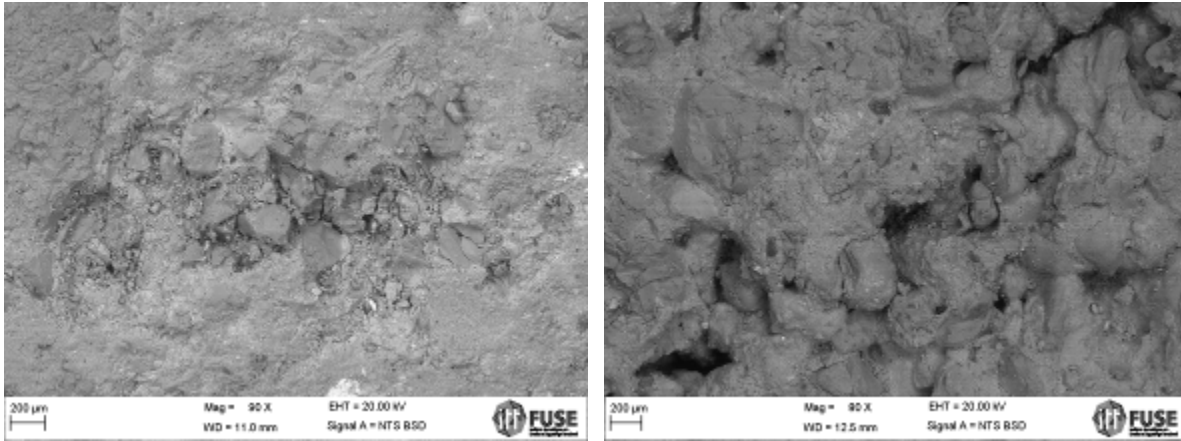
A imagem do MEV para o TREF3 pode ser visto na Figura 42.



**Figura 42 - Micrografia do bloco c/ TREF3 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b) (aumentado 90x).**

Diferentemente dos blocos analisados anteriormente, os blocos com traço de referência rico em consumo de cimento apresentaram uma estrutura fechada, com a presença mínima de pequenos poros, o que resultou em uma baixa absorção de água e consequentemente na maior resistência à compressão de todos os traços ensaiados.

A imagem do MEV para o TS3 pode ser visto na Figura 43.

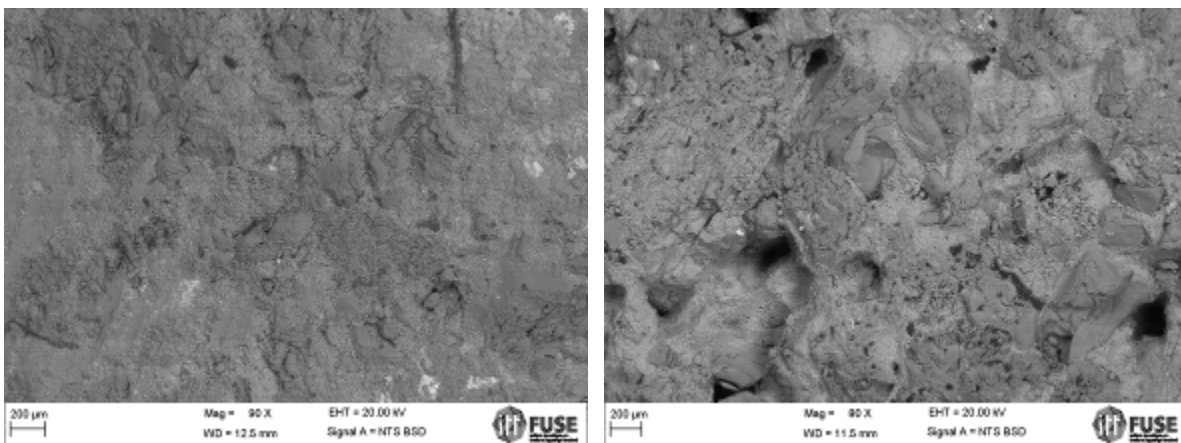


(b)

**Figura 43 - Micrografia do bloco c/ TS3 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b) (aumentado 90x).**

Os blocos com TS3 apresentaram uma estrutura similar aos blocos com TS2 e TS5, principalmente na posição horizontal, com alguma presença de poros, porém em menor quantidade. Mesmo assim, este traço apresentou elevada resistência à compressão, indicando que mesmo com 25% de COP, um traço rico em consumo de cimento atinge resistência igual ou superior ao requerido pela NBR 9781 (21013).

As imagens do MEV para o TS6 podem ser vistas na Figura 44.



(a)

(b)

**Figura 44 - Micrografia do bloco c/ TS6 na posição vertical (a) e na posição horizontal (b) (aumentado 90x).**

Os blocos com TS6 que contém 50% de COP apresentam uma estrutura semelhante ao traço com 25% de substituição, mostrando que não houve um adensamento adequado do concreto, provocando porosidade e conseqüentemente uma diminuição na resistência mecânica à compressão.

#### 4.2.6 Avaliação Ambiental dos Blocos de Concreto

A avaliação ambiental dos blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial da areia natural pela combinação dos resíduos AFUF e AVUF foi realizada através dos ensaios de lixiviação e solubilização. Estes ensaios foram realizados pela empresa Econsulting Projetos e Consultoria Ambiental Sociedade Simples Ltda, de Viamão, RS, conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004).

Conforme o laudo fornecido pela empresa Econsulting, tem-se as seguintes avaliações, de acordo com os termos referidos na norma:

- Inflamabilidade: A amostra não apresentou a característica Inflamabilidade.
- Corrosividade: A amostra apresentou pH (Sol 5%) igual a 10,53 não apresentando a característica corrosividade.
- Reatividade: A faixa de pH indicada e os componentes utilizados no processo produtivo não indicam a amostra como sendo isenta da característica reatividade.
- Toxicidade: A amostra não apresentou a característica toxicidade.
- Patogenicidade: A amostras não apresentou a característica patogenicidade

A Tabela 26 mostra a composição química da amostra contendo o co-produto.

**Tabela 26 - Composição química do resíduo de fundição.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados</b>
Matéria Orgânica	4,18%
Cinzas	93,0%
Umidade	2,82%
pH	10,53

Segundo o laudo de análises e de acordo com os resultados de lixiviação e solubilização mostrados na Tabela 27 e Tabela 28 respectivamente, a amostra do bloco de concreto contendo a AFUF e a AVUF como matéria-prima foi classificada como resíduo Classe II A - Não Inerte de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

**Tabela 27 – Resultado do ensaio de lixiviação conforme NBR 10005 (2004) para os blocos de concreto para pavimentação.**

Parâmetros	Unidade	Resultados da amostra	Limite máximo (mg/L) (NBR 10005)
Arsênio	µg/L	< 1,5	1,0
Bário	mg/L	1,057	70,0
Cádmio	mg/L	< 0,002	0,5
Chumbo	mg/L	< 0,008	1,0
Cromo Total	mg/L	< 0,015	5,0
Mercúrio	µg/L	< 0,5	0,1
Prata	mg/L	< 0,0015	5,0
Fluoreto	mg/L	1,96	150,0
Selênio	µg/L	< 2,0	1,0

No extrato lixiviado todos os parâmetros analisados se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 10004:2004.

**Tabela 28 - Resultado do ensaio de solubilização (NBR 10006) para os blocos de concreto para pavimentação aos 28 dias de cura.**

Parâmetros	Unidade	Resultados da amostra	Limite máximo (mg/L) (NBR 10006)
Alumínio	mg/L	0,284	0,2
Arsênio	µg/L	< 1,5	0,01
Bário	mg/L	0,020	0,7
Cádmio	mg/L	< 0,002	0,005
Sódio	mg/L	47,06	200,0
Cobre	mg/L	0,048	2,0
Zinco	mg/L	< 0,100	5,0
Chumbo	mg/L	< 0,008	0,01
Cromo Total	mg/L	< 0,015	0,05
Ferro	mg/L	0,429	0,3
Manganês	mg/L	0,205	0,1
Mercúrio	µg/L	< 0,5	0,001
Fenol	mg/L	< 0,001	0,01
Nitrato	mg/L	0,179	10,0
Cianeto	mg/L	< 0,0003	0,07
Sulfato	mg/L	1,26	250,0
Surfactantes	mg/L	0,321	0,5
Cloreto	mg/L	26,3	250,0
Fluoreto	mg/L	0,496	1,5
Prata	mg/L	< 0,0015	0,05
Selênio	µg/L	< 2,0	0,01

Na solubilização dos blocos os elementos Al, Fe e Mn ficaram acima do limite máximo estipulado pela norma. Esses valores para o Al e o Fe condizem com o resultado da análise quantitativa da FRX, onde se encontrou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em percentuais mais altos,

sendo de 4,646 e 2,693 respectivamente. Já a solubilização do Mn não pode ser atribuída aos resíduos, pois na análise de FRX foi encontrado como elemento traço, com presença mínima na composição das areias de fundição.

De acordo com os resultados apresentados, como a amostra foi classificada como resíduo Classe II A – Não Inerte, não haveria problemas em aproveitar esses resíduos de fundição como matéria-prima na construção civil, desde que dosados adequadamente, baseado na NBR 10004, ainda utilizada para determinação do impacto ambiental de resíduos sólidos industriais adicionados em produtos de construção civil. Sendo assim, pode-se obter um ganho ambiental enorme, uma vez que usado o co-produto em substituição da areia natural, diminui-se a extração de areia dos rios, minimizando a degradação ambiental e ainda diminuindo as áreas de disposição dos resíduos de fundição.

#### **4.2.7 Avaliação Econômica**

A avaliação econômica dos blocos de concreto com 25% e 50% de substituição da AN pela combinação da AFUF e AVUF e os blocos com 100% de AN foi realizada levando em consideração os seguintes fatores:

- frete – o custo com frete da empresa de fundição até a empresa fabricante dos blocos seria em torno de 15% menor que o valor pago atualmente da jazida até a fábrica;
- AN x combinação dos resíduos – como a combinação entre a AFUF e a AVUF não é comercializado atualmente como matéria-prima, foi estipulado um valor de  $\frac{1}{4}$  do valor da AN para fins de cálculo comparativo. Cabe salientar que hoje em dia a empresa de fundição paga em média R\$ 115,00 para dispor 1 m<sup>3</sup> de resíduo em aterro industrial;
- água – considerou-se o valor para um acréscimo entre 50% e 100% na relação água/cimento para os traços com 50% de substituição. Isso levando em consideração a umidade dos agregados nos dias que foram produzidos os blocos;
- processos de produção e cura – os processos utilizados não sofreram modificações com o uso dos resíduos como matéria-prima, portanto não há diferença de custo.

Com base nesses fatores, foi calculado o valor para produção de 1 m<sup>2</sup> de bloco intertravado de concreto produzido sob os parâmetros da empresa parceira deste trabalho. Os cálculos foram realizados sobre os traços que apresentaram os maiores valores de resistência à compressão. Os resultados obtidos mostraram que para produzir 1 m<sup>2</sup> de bloco de concreto com 25% de substituição da AN pelos resíduos, mesmo com o traço rico em consumo de

cimento “TS3”, ainda assim teve uma redução de 1% no custo de produção desses blocos que apresentaram uma média de 37,2 MPa de resistência à compressão o que é superior ao mínimo de 35 MPa solicitados pela NBR 9781 (2013) para pavimentos com tráfego de veículos comerciais de linha. Para os blocos produzidos com o TS6, com 50% de substituição e resistência à compressão média de 32,2 MPa, foi obtido uma redução de 3% no custo de produção, o que pode ser muito significativo financeiramente para empresas que produzem blocos nessa faixa de resistência em casos onde não sejam exigidos a resistência mínima de 35 MPa estabelecidos pela norma.

Outro ponto importante economicamente é a questão do metal presente nos resíduos AFUF e AVUF, onde se retirou entre o peneiramento e a separação magnética em média 1% de material metálico. Usando como comparação a média do volume gerado mensalmente de resíduos pela empresa de fundição parceira no período do presente trabalho, que estava baixa, teríamos ao longo de um ano mais de 1 tonelada de metal recuperado, sendo que é possível reaproveitá-lo novamente no processo, gerando economia com a compra de matéria-prima.

Sendo assim, de acordo com as matérias-primas, parâmetros e custos utilizados neste trabalho, julga-se pertinente a substituição da AN pela combinação dos resíduos de fundição AFUF e AVUF, podendo trazer ganhos econômicos tanto para a empresa geradora dos resíduos quanto para a empresa fabricante dos blocos de concreto, além de ganhos ambientais evitando contaminações com disposição incorreta.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o uso do co-produto formado a partir de composição da areia fenólica usada de fundição (AFUF) e da areia verde usada de fundição (AVUF) em substituição parcial do agregado miúdo natural (AN) na fabricação comercial de blocos intertravados de concreto para pavimentação, o que delineou o programa experimental exposto no Capítulo 3 e gerou uma série de resultados, já apresentados no Capítulo 4. Cabe salientar que tais resultados devem ser limitados às matérias-primas, equipamentos e condições utilizados nesse experimento. Com base no exposto ao longo deste trabalho, foram obtidas algumas conclusões que serão apresentadas a seguir.

**Quanto à influência da utilização de AFUF e AVUF como matéria-prima no comportamento da resistência mecânica à compressão para as idades de 7 e 28 dias, pode-se considerar que:**

- a análise de variância (ANOVA) dos dados de resistência à compressão, a um nível de confiança de 95%, indica que todos os fatores isolados estudados apresentam um efeito significativo sobre a resistência à compressão, assim como as interações de 1ª ordem entre traço (TR) e o teor de resíduo (RES) e entre TR e a idade (IDD) e também na interação de 2ª ordem entre TR, RES e IDD;
- em relação a substituição parcial do agregado miúdo areia natural pelo co-produto nos teores de 25% e 50%, os blocos de concreto apresentaram resultados de resistência à compressão inferiores quando comparados aos blocos com o concreto de referência aos 28 dias de cura. No entanto, avaliando somente a influência do fator “teor de resíduo”, considerando todas as idades e traços, os blocos de concreto com 25% de co-produto obtiveram resistência maior que os blocos de concreto com 50% de co-produto;
- em relação aos traços utilizados, a análise do efeito isolado deste fator sobre a resistência mecânica à compressão, considerando todos os teores de resíduo e todas as idades, indica que o traço rico apresenta a maior resistência em relação aos demais traços;

- em relação ao efeito isolado do fator “idade”, nota-se um aumento da resistência à compressão dos blocos cerca de 48% do 7º ao 28º dia de cura. Já a análise do efeito da interação entre o TR e a IDD mostrou que independente do traço, a resistência é maior aos 28 dias;
- em relação a análise do efeito das interações entre o TR, o RES e a IDD, observa-se que o traço rico com 25% de substituição parcial da areia natural pelo co-produto foi o que alcançou a maior resistência à compressão aos 28 dias de cura. Já o traço pobre, tanto com 25% quanto com 50% de substituição, apresentou aos 28 dias resistência maior que o traço intermediário;
- o maior valor médio de resistência à compressão aos 28 dias de cura foi observado para a combinação do traço rico com 25% de substituição, atingindo 37,2 MPa de resistência, valor superior ao mínimo exigido pela NBR 9781 (ABNT, 2013) para blocos de pavimentação para tráfego de veículos comerciais de linha, seguido pelo mesmo traço, porém com 50% de substituição que obteve a resistência à compressão média de 32,2 MPa. A seguir, o traço pobre, tanto com 25% quanto com 50% de co-produto, apresentou os maiores valores de resistência à compressão, ficando o traço intermediário com as resistências mais baixas.
- com exceção do TS5, que é o traço intermediário com 50% de substituição de areia natural pelo co-produto, todos os demais traços, tanto com 25% quanto com 50% de substituição, obtiveram aos 28 dias de cura resistência à compressão acima de 25 MPa, que segundo Scott Hood (2006), pode ser considerado um valor viável para blocos de concreto que serão utilizados em pavimentos que apresentam menores solicitações de tráfego de veículos ou pedestres, porém não atende o mínimo de 35 MPa requerido pela norma.
- de maneira geral, a substituição parcial da areia natural pelo co-produto tanto com 25% quanto com 50% do COP, pode ser viável tecnicamente em se tratando de resistência à compressão, para produção de diversos tipos e/ou uso de blocos de concreto, como, ciclovias, calçadas, pavimento de estradas (desde que atinja resistência característica de 35 MPa), etc.



**Quanto à influência da utilização de AFUF e AVUF como matéria-prima nos resultados do índice de desgaste por abrasão, pode-se considerar que:**

- o índice de desgaste por abrasão diminuiu com o aumento do percentual de substituição de areia natural pela combinação da AFUF com a AVUF;
- tecnicamente não há diferença entre os valores médios encontrados para o índice de desgaste por abrasão nos blocos com 25% de substituição da areia natural quando comparado com o traço de referência, ou seja, esse teor não influencia significativamente nos resultados obtidos.
- o teor de 50% de substituição influencia negativamente no índice de desgaste por abrasão.

**Quanto à influência da utilização de AFUF e AVUF como matéria-prima nos resultados de absorção de água, pode-se considerar que:**

- a análise estatística por meio da ANOVA da variável de resposta “absorção de água” mostrou que apenas o fator isolado “RES” exerce efeito significativo no comportamento dos concretos;
- quanto maior o percentual de substituição de areia natural pelo co-produto, maior o percentual de absorção de água dos blocos de concreto;
- mesmo com o aumento da absorção de água dos blocos com substituição em relação aos blocos de referência, os valores obtidos estão abaixo do limite máximo de 10% requeridos pela NBR 12118 (ABNT, 2011).

**Quanto à influência da utilização de AFUF e AVUF como matéria-prima nos resultados do índice de vazios, pode-se considerar que:**

- tanto os fatores isolados “TR” e “RES” quanto a interação entre eles, não são significativos a um nível de confiança de 95%, ou seja, não interferem no resultado do índice de vazios;
- o índice de vazios pode estar relacionado à resistência a compressão, que apresentou os traços intermediários (TREF2, TS2 e TS5) com as menores médias de resistência à compressão aos 28 dias de cura e o maior índice de vazios, com exceção para o TREF2.

**Quanto à viabilidade ambiental da utilização de AFUF e AVUF como matéria-prima nos blocos de concreto para pavimentação, pode-se considerar que:**

- a amostra de bloco contendo substituição parcial da areia natural pela combinação da AFUF com a AVUF não apresentou características que pudessem reprovar o seu uso;
- de acordo com os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização, a amostra do bloco de concreto contendo os resíduos de fundição foi classificada como resíduo Classe IIA - Não Inerte de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

**Quanto à viabilidade econômica da utilização de AFUF e AVUF como matéria-prima nos blocos de concreto para pavimentação, pode-se considerar que:**

- a empresa de fundição geradora dos resíduos poderá sofrer uma inversão nos seus custos, deixando de pagar pela disposição em aterros industriais para vender, mesmo que a um valor simbólico, a AFUF e a AVUF como matérias-primas para a construção civil;
- a empresa fabricante dos blocos de concreto poderá adquirir os resíduos a um valor menor que o valor pago para a areia natural, permitindo reduzir o custo final dos blocos de concreto.

Dentro do que foi estudado, os melhores resultados foram alcançados utilizando o traço rico em consumo de cimento com 25% de substituição da areia natural pela combinação entre a AFUF e a AVUF.

Com base nessas conclusões, acredita-se que o uso combinado dos resíduos de fundição AFUF e AVUF como matéria-prima em substituição parcial ao agregado natural, seja passível de utilização na construção civil como um co-produto de valor comercial agregado, tanto pelas características químicas, físicas e ambientais, quanto à econômica, desde que as empresas envolvidas se unam com o intuito de promover essa simbiose industrial, buscando apoio e permissões dos órgãos responsáveis pelo controle desses resíduos, para o uso como matéria-prima podendo gerar ganho econômico para ambas as empresas, mas principalmente, o ganho ambiental.

## 6 SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso de um co-produto formado a partir da composição das AFUV e AVUF em substituição parcial de 25% e 50% do agregado miúdo natural (AN) na fabricação de blocos intertravados de concreto para pavimentação. Todavia, outros aspectos e variáveis relativos aos resíduos e aos blocos de concreto podem ser estudados. Como sugestões de continuidade para outros estudos relacionados ao tema abordado neste trabalho, sugere-se:

- estudo de uma metodologia de dosagem específica para o concreto utilizado resíduos na produção dos blocos intertravados para pavimentação;
- estudo da melhor faixa granulométrica para o co-produto a ser utilizado em substituição a areia natural;
- avaliação de teores de 5%, 10%, 15% e 20% de substituição da AN pela composição entre AFUF e AVUF;
- estudo de combinações da AFUF e AVUF com outros resíduos de fundição em substituição do agregado miúdo no concreto;
- avaliação do uso de outros tipos de cimento e aditivos nos concretos com as AFUF e AVUF;
- avaliação do uso das combinações de AFUF e AVUF em blocos de concreto estrutural e de vedação;
- estudo dos parâmetros de vibração e compressão do equipamento de moldagem dos blocos;
- estudo sobre o melhor empacotamento entre o COP e os agregados miúdos e graúdos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Disponível em: <<http://www.abcp.com.br/>>. Acesso em: 13 jun. 2012.

ABIFA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Notícias**. Disponível em: <[http://www.abifa.com.br/Noticias\\_.aspx?ID\\_NOTICIA=108](http://www.abifa.com.br/Noticias_.aspx?ID_NOTICIA=108)>. Acesso em: 10 mar. 2012.

\_\_\_\_\_. **Manual de Regeneração e Reuso de Areias de Fundição**. Elaborado pela Comissão de Meio Ambiente da Associação Brasileira de Fundição, 1. Ed. São Paulo, 49 p. 1999.

AMADEI, Daysa Ione Braga. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda / PR**. 2011. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, PR, 2011.

ALONSO-SANTURDE, Rebeca et al. Valorization of foundry sand in clay bricks at industrial scale. Environmental behavior of clay-sand mixtures. Research and Analysis. **Journal of Industrial Ecology**, Santander, v. 14, n. 2, p. 217 – 230, 2010.

ARNOLD, Daiana Cristina Metz. **Análise da Influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 47: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico**. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5732: Cimento Portland Comum**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5735**: Cimento Portland de Alto Forno. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5737**: Cimento Portland Resistente a Sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão com corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para Concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9780**: Peças de Concreto para Pavimentação: Determinação da Resistência a Compressão. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9781**: Peças de Concreto para Pavimentação: Especificação e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005**: Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**: Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 47**: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ARANZABAL, G. et al. **Used Sand Management in Foundries. Rewas'99** – Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology. Espanha, Vol. 1, p. 85-93, 1999.

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

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**. 1999. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 1999.

BHIMANI, D. R.; PITRODA, J.; BHAVSAR, J. J. A Study on Foundry Sand: Opportunities for Sustainable and Economical Concrete. **Global Research Analysis**. Índia, vol. 2, n. 1, p. 60 – 63, 2013.

BITENCOURT, Daniela. **Estudo investigativo para utilização de areias de fundição na confecção de concreto**. 2006. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Programa de Pós-Graduação em Energia, Ambiente e Materiais, Universidade Luterana do Brasil – ULBRA, 2006.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 16 jun. 2012.

CALHEIRO, Daiane et al. Influência da Areia Fenólico-Alcalina Usada de Fundição (AF) na Resistência à Compressão e na Absorção de Água. In. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XIII., 2010, Canela. **Anais...** Canela: ENTAC, 2010.

CALHEIRO, Daiane et al. Avaliação da reciclagem de areia fenólica-alcalina usada de fundição (AF) na produção de concreto. In. CONGRESSO ANUAL INTERNACIONAL DA ABM, 65, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABM, 2010. p. 3260-3272.

CARNIN, R. L. P. et al. Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. **Revista Pavimentação**, ano V, p. 56-67, 2010.

CARNIN, R. L. P. et al. Use of an integrated approach to characterize the physicochemical properties of foundry green sands. **Thermochimica Acta**, n. 543. 2012. p. 150-155.

CECCATTO, Daiane M. **Avaliação da Utilização de Escória Granulada de Fundição (EGF) como Substituição de Parte do Cimento em Concreto: propriedades mecânicas**. 2003. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2003.

CECCATO, Marcos Roberto. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 1998. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 1998.

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. **Redução do desgaste de areia de fundição e do consumo de areia nova na indústria de fundição**. São Paulo, Jul. 2002.

CIMM – Centro de Informações Metal Mecânicas. **Material Didático**. Disponível em:

<<http://www.cimm.com.br>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

CRUZ, Luiz Otávio Maia. **Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento**. 2003. 186 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

CUNHA, André de Brito e. **Estudo da contaminação por compostos fenólicos de uma área impactada por resíduo de areia de fundição**. 2005. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2005.

Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral. **Agregados para Construção Civil**. 33 p. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. 2009. Brasília, 2009.

DIEHL. M. D. Regeneração de Areias de Fundição. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 51., 1996, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Resumos, 1996

ESTAL/MME - **Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia/ Ministério de Minas e Energia**. Produto 35, Cadeia da Fundição - Relatório Técnico 61, Perfil da Fundição (2009). Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/a\\_transformacao\\_mineral\\_no\\_brasil/P35\\_RT61\\_Perfil\\_da\\_Fundicao.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_transformacao_mineral_no_brasil/P35_RT61_Perfil_da_Fundicao.pdf)> Acesso em: 23 out. 2012.

EXTRAÇÃO de areia destruiu margens do Rio Jacuí, dizem ambientalistas. Jornal Nacional, Rio de Janeiro, Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2013/01/extracao-de-areia-destruiu-margens-do-rio-jacui-dizem-ambientalistas.html>> Acesso em: 20 jan. 2013.

FABRO, Fabi et al. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 191-212, 2011.

FIORITI, Cesar Fabiano; INO, Akemi; AKASAKI, Jorge Luiz. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 43-54, 2007.

FOUNDRY GATE, Produção de fundidos fecha 2012 com forte queda. Disponível em <<http://foundrygate.com/br/noticias/ver/1850/brasil-producao-de-fundidos-fecha-2012-com-forte-queda>> Acesso em: 21 mai. 2013.

FRANCO, Janaína de Melo. **Produção de blocos de concreto para pavimentação (BCP) utilizando resíduos de galvanoplastia**. 2011 . 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2011.

FRASSON JÚNIOR, Artêmio. **Proposta de Metodologia de Dosagem e Controle no Processo Produtivo de Blocos de Concreto para Alvenaria Estrutural**. 2000. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 2000.

GIDLEY, J. S.; SACK, W. A. Environmental Aspects of Waste Utilization in Construction. **Journal of Environmental Engineering**, Los Angeles, v. 110, n. 6, p. 1117-1133, 1984.

G1(a). Governo diz que não tem alternativa ao Rio Jacuí para extração de areia. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2013/06/governo-diz-que-nao-tem-alternativa-ao-rio-jacui-para-extracao-de-areia.html>> Acesso em: 04 jun. 2013.

G1(b). Mineradoras são multadas por problemas na extração de areia no RS. Bom dia Rio Grande. RS. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2013/06/mineradoras-sao-multadas-por-problemas-na-extracao-de-areia-no-rs.html>> Acesso em: 21 jun. 2013.

JOHN, Vanderley M. A Construção e o Meio Ambiente. DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL, PCC. Disponível em: [http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a\\_construcao\\_e.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm). Acesso em: 12 fev. 2012.

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

KHATIB, J. M. et al. Foundry sand utilisation in concrete production. In. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES, 2. 2010. Ancona. **Anais ...** Ancona, 2010; p. 931–938.

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

LAWRENCE, D.; MAVROULIDOU, M. Properties of concrete containing foundry sand. In. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 11. 2009. Crete. **Anais...** Crete, 2009.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2001.

MACIEL, C. B. **Avaliação da Geração do Resíduo Sólido Areia de Fundição visando sua minimização na empresa Metalcote Metalurgia – Fundição**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Tecnologias Limpas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2005.

MARIOTTO, C. L. Regeneração de areias: uma tentativa de discussão sistemática. **Fundição e Matérias-primas**, São Paulo, v. 33, n. 42, 2000.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**. São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.



MEDEIROS, H. **Piso Intertravado.** Disponível em: <<http://www.equipededeobra.com.br/construcao-reforma/18/artigo96977-2.asp>> - Acesso em: 08 out. 2012.

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

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008. p. 674.

MYHRE, B.; HUNDERE, A. On the influence of superfines in high alumina castables. In. INTERNATIONAL COLLOQUIUM OF REFRACTORIES, 39., 1996, Aachen. **Anais...** Aachen, 1996.

MOHAMAD, Gihad et al. Estudo de caracterização mecânica de blocos de concreto vibrocompactados à seco. **Revista Matéria**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 638 – 657, 2011.

MORAES, Carlos Alberto Mendes. **Notas de aula Disciplina de Fundição.** Unisinos, 2005.

MORAES, Carlos Alberto Mendes. **Notas de aula Disciplina de Fundição e do Programa de Pós-Graduação.** Unisinos, 2011.

MORAES, Carlos Alberto Mendes. Reciclagem de resíduos sólidos de fundição: uma análise crítica. In. CONGRESSO INTERNACIONAL ANUAL DA ABM, 57. 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 2002.

MORAES, Carlos Alberto M.; VILELA, Antônio C. F.. **Resíduos sólidos nas indústrias siderúrgicas e de fundição.** Apostila. Porto Alegre: UFRGS, 2001.

MPF mantém suspensão extração de areia no rio Jacuí. Jornal Correio do Povo. Porto Alegre. Disponível em: <<http://portallw.correiodopovo.com.br/Noticias/?Noticia=501963>> Acesso em: 30 jun. 2013.

MULLER, Rodrigo Menegaz. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto.** 2005. 256 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

NÚÑEZ, W. P.; MORAES, C. A. M.; BREHM, F. A. Adição de areia de fundição em mistura asfáltica para pavimentação. **Revista Pavimentação.** São Paulo, Ano II, n. 7, p. 30-36, 2007.

OKIDA J. R. **Estudo para Minimização e Reaproveitamento de Resíduos Sólidos de Fundição.** 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2006.

OLENBUSH, E. **Foundries Share Successful Models for Beneficial Reuse.** Modern casting, 1999, 6 p.

OLIVEIRA, Alexandre Lima de. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, 2004.

OLIVEIRA, R. C. N. de; CAMPOS, R. P.; HADADD, A. N. Análise de risco do setor de extração de areia. Rio Preto – Estudo de Caso. In. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIX. 2011, Maceió. **Anais...** Alagoas: ABRH, 2011.

OLIVEIRA, S. Sobrecarga do rio Jacuí reacende debate sobre extração de areia no Guaíba, **Jornal online SUL21**. Disponível em: <<http://www.sul21.com.br/jornal/2013/01/sobrecarga-do-rio-jacui-reacende-debate-sobre-extracao-de-areia-no-guaiba/>>. Acesso em: 20 jan. 2013.

PABLOS, Javier Mazariegos. **Estudo para a reutilização do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da técnica de solidificação / estabilização em matrizes de cimento portland, para aplicação no setor da construção civil**. 2008. 146 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) -- Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 2008.

PABLOS, Javier Mazariegos et al. Estudo para utilização de resíduos sólidos industriais, gerados pelos descartes de areia de fundição aglomeradas com argila e pelas escórias de alto-forno, na composição dos concretos. In: SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2. ed. 2011, Maceió. **Anais...** Maceió: ENARC, 2011.

PAGNUSSAT, Daniel Tregnago. **Utilização de escória granulada de fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

PANAZZOLO, Diego Felipe. **Estudo da viabilidade de utilização de agregados artificiais e areia verde de fundição na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2007. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2007.

PEREIRA, Aerton. **Estudo da viabilidade técnica e ambiental da incorporação de resíduo de areia de fundição em matriz asfáltica**. 2004. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, 2004.

PERUFFO, Vinícius. **Estudo da viabilidade de utilização de escória granulada de fundição na fabricação de blocos de concreto para pavimentação**. 2008. 136 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) -- Curso de Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2008.

PETTERMANN, Rodrigo. **Avaliação do desempenho de blocos de concreto para pavimentação com metacaulim e sílica ativa**. 2006. 71 f. Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização (Especialização em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2006.

PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A. Concreto refratário auto-escoante: metodologia de formulação e correlações entre distribuição granulométrica e reológica. **Revista Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 1 n. 3, p. 7-12, 1996.

PIOVESAN, A. Z.; et al. Utilização da areia de fundição para fabricação de blocos de concreto para pavimentação. In ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XII. 2008. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, ENTAC, 2008.

PIROLA, Fernanda Carvalho. **Contribuição para o estudo do concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação de 50 MPa**. 2011. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, 2011.

POWERS, M. C. A new roundness scale for sedimentary particles. **Journal of Sedimentary Research**. v. 23. p. 117-119, 1953.

RECENA, Fernando Antônio Piazza. **Dosagem empírica e controle de qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 1 ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002.

RESCHKE, Juliana Soares. **Escória Granulada de Fundição Utilizada como Substituição ao Cimento em Concreto: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. 2003. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2003.

RESCHKE, Juliana Soares et al. Avaliação da utilização de escória granulada de fundição como substituição de parte do cimento em concreto. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 78 – 91, 2005.

RIBEIRO, Marcela G.; FILHO, Walter R. P. Risk assessment of chemicals in foundries: The International Chemical Toolkit pilot-project. **Journal of Hazardous Materials**, São Paulo, n. 136, p. 432 – 437, 2006.

RODRIGUES, A. et al. **Resíduos Químicos: Gestão e Possíveis Tratamentos**. 2010. 112 f. Trabalho de Conclusão de Extensão (Extensão em Higiene Ocupacional). Universidade Estadual Paulista – UNESP, São Paulo, SP, 2010.

SANTOS, M. L. L. de O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para construção civil**. 2008. 165 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2008.

SBRIGHI NETO, C. Agregados para concreto. In: ISAIÁ, G. C. Ed. **Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v.1. p. 323-343, 2005.

SCOTT HOOD, Rogério da Silva. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de**

**concretopara pavimentação.** 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil -- Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2006.

SIDDIQUE, R.; et al. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS). **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1916-1925, 2011.

SIDDIQUE R, GUPTA R, KAUR I. Effect of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregate on the properties of concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID WASTE TECHNOLOGY AND MANAGEMENT; 22., **Anais...**, 2007.

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

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

SIEGEL, Miguel. ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. **Curso de Fundição.** 6ª Edição. São Paulo: ABM, 1975.

SIEGEL, Miguel et al. ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. **Fundição.** 13ª Edição. São Paulo: ABM, 1982.

SILVA, Wilson R. L. da. Influence of foundry sand residues on the freshand hardened properties of mortars produced with portland cement. **IBRACON Structures and Materials Journal**, São Paulo, v. 4, n. 4, p. 642 – 662, 2011.

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

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Press Kit 2012.** 22 p., 2012.

SOUSA, José Getúlio Gomes de. **Contribuição ao Estudo da Relação entre Propriedades e Proporcionamento de Blocos de Concreto – Aplicação ao Uso e Entulho como Agregado Reciclado.** 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2001.

SUMÁRIO MINERAL, Departamento Nacional de Produção Mineral. v. 32, 136 p., 2012. DNPM/MME – Brasília, 2012.

VALVERDE, Fernando. M. Sumário Mineral Brasileiro 2006 – **Agregados para Construção Civil.** DNPM/MME, p17-18. Disponível em:<<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=64>>. Acesso em: 11 fev. 2012.

VARGAS, Alexandre Silva de. **Estudo da Viabilidade do Uso de Pó de Aciaria Elétrica e Arco na Confeção de Blocos de Concreto para Pavimentação**. 2002. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFGRS, Porto Alegre, RS, 2002.

VIECILI, Fábio André. **Influência da utilização dos endurecedores superficiais cimentícios na resistência à abrasão de pisos industriais de concreto**. 2004. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

VOLD, Marjorie J. Differential thermal analysis. *Analytical Chemistry*, 1949, 21 (6), p 683–688. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60030a011>> Acesso em: 3 nov. 2011.

WATANABE, F. A. et al. Caracterização de pavimentos de concreto fabricados em equipamentos industriais com a adição de areia de fundição. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17. 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBECIMat, 2006.

WERLE, Ana Paula. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação**. 2010. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2010.

WINKLER, E. S.; BOL'SHAKOV, A. A. **Characterization of foundry sand waste**. Technical Report, n. 31. Chelsea Center for Recycling and Economic Development Technical Research Program. University of Massachusetts, 2000.

ZANETTI, M. C.; FIORE, S. Foundry Process: the recovery of Green moulding sands for core operations. **Resources Conservation & Recycling**, v. 38, p. 243-254, 2002.

## **APÊNDICE**

**Tabela 29 - Empacotamento entre a AVUF e a AVUF.**

%	AFUF	AVUF	M 1	M 2	M 3	Média	Unitária	Específica	E - U	E/U	Vv
0	0	1000	374,0	374,9	374,0	374,29	1,15	2,05	0,90	1,79	44,1
10	100	900	394,4	395,7	394,3	394,80	1,21	2,09	0,88	1,73	42,1
20	200	800	394,6	394,7	395,1	394,81	1,21	2,13	0,92	1,76	43,2
30	300	700	405,8	405,3	405,9	405,66	1,24	2,17	0,93	1,75	42,8
40	400	600	416,0	417,1	415,5	416,20	1,28	2,22	0,94	1,74	42,4
50	500	500	431,4	429,2	430,7	430,42	1,32	2,26	0,94	1,71	41,7
60	600	400	441,1	441,0	442,5	441,53	1,35	2,31	0,96	1,71	41,4
70	700	300	446,6	447,4	447,2	447,06	1,37	2,36	0,99	1,72	41,9
80	800	200	457,6	458,7	459,6	458,60	1,41	2,41	1,00	1,71	41,7
90	900	100	466,7	467,9	468,3	467,64	1,43	2,46	1,03	1,72	41,8
100	1000	0	473,3	473,3	473,5	473,35	1,45	2,52	1,07	1,74	42,5

**Tabela 30 - Resistência à compressão aos 7 dias de cura.**

Traços	Cimento / Agregado	A/C	CP's	Resistência Compressão (Mpa)	Média Resist. Comp. (Mpa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação (%)
TREF 1	1:6,46	0,1	1	25,7	25,35	2,49	10%
			2	27,3			
			3	29,1			
			4	22,8			
			5	24,1			
			6	23,1			
TREF 2	1:5,96	0,1	1	17,3	19,83	2,19	11%
			2	19,1			
			3	18,5			
			4	23,5			
			5	19,5			
			6	21,1			
TREF 3	1:5,46	0,1	1	34,7	35,63	2,18	6%
			2	35,9			
			3	32,8			
			4	39,0			
			5	34,4			
			6	37,0			
TS1	1:6,46	0,1	1	17,4	19,1	2,18	11%
			2	22,1			
			3	21,2			
			4	19,1			
			5	16,5			
			6	18,3			
TS2	1:5,96	0,1	1	22,9	24,94	3,20	13%
			2	23,8			
			3	21,3			
			4	24,1			
			5	27,6			
			6	29,9			
TS3	1:5,46	0,1	1	17,1	16,69	1,94	12%
			2	20,2			
			3	15,6			
			4	15,8			
			5	16,8			
			6	14,6			
TS4	1:6,46	0,15	1	17,8	13,97	2,04	15%
			2	13,1			
			3	12,5			
			4	13,1			
			5	14,7			
			6	12,6			
TS5	1:5,96	0,15	1	13,7	14,1	1,34	10%
			2	12,7			
			3	16,2			
			4	14,3			
			5	14,6			
			6	12,6			
TS6	1:5,46	0,2	1	12,1	16,74	4,23	25%
			2	13,7			
			3	13,1			
			4	20,9			
			5	19,1			
			6	21,5			



**Tabela 31 - Resistência à compressão aos 28 dias de cura.**

Traços	Cimento / Agregado	A/C	CP's	Resistência Compressão	Média Resist. Comp. (Mpa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação (%)
TREF 1	1:6,46	0,1	1	38,0	35,6	2,25	6%
			2	35,8			
			3	33,6			
			4	32,2			
			5	37,3			
			6	36,6			
TREF 2	1:5,96	0,1	1	30,2	28,44	3,89	14%
			2	25,4			
			3	25,9			
			4	26,8			
			5	35,6			
			6	26,7			
TREF 3	1:5,46	0,1	1	39,3	42,28	1,90	5%
			2	41,7			
			3	42,6			
			4	44,4			
			5	44,2			
			6	41,5			
TS1	1:6,46	0,1	1	35,3	31,84	4,06	13%
			2	28,4			
			3	27,2			
			4	32,5			
			5	30,0			
			6	37,6			
TS2	1:5,96	0,1	1	24,5	25,27	2,11	8%
			2	23,4			
			3	24,6			
			4	26,2			
			5	23,8			
			6	29,1			
TS3	1:5,46	0,1	1	33,5	37,22	4,58	12%
			2	32,4			
			3	33,8			
			4	40,2			
			5	39,8			
			6	43,6			
TS4	1:6,46	0,15	1	24,6	25,62	3,03	12%
			2	23,8			
			3	30,6			
			4	27,9			
			5	24,3			
			6	22,5			
TS5	1:5,96	0,15	1	26,4	22,32	2,68	12%
			2	19,7			
			3	21,5			
			4	22,3			
			5	19,6			
			6	24,4			
TS6	1:5,46	0,2	1	28,1	32,2	5,12	16%
			2	29,2			
			3	29,3			
			4	38,6			
			5	28,9			
			6	38,9			

**Tabela 32 - Resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios.**

Blocos	Quente (Ms)	Frio (+4horas) (M)	Imerso (Mi)	saturado (Msat)	Absorção (%)	Média (%)	Índice vazios (%)	Média (%)
TR1-14	4174,8	4177,3	2507,6	4495,1	7,67		16,12	
TR1-16	4094,2	4097,9	2449,1	4374,5	6,85	7,35	14,56	15,47
TR1-15	3944,8	3948,8	2353,3	4241,8	7,53		15,73	
TR2-32	4131,9	4134,7	2470,5	4394	6,34		13,63	
TR2-30	4088,5	4092	2405,4	4329	5,88	6,33	12,50	13,52
TR2-05	4039,9	4043	2421,9	4313	6,76		14,44	
TR3-26	4132	4134	2984,2	4353,9	5,37		16,20	
TR3-30	4100	4102,9	2464,5	4320,2	5,37	5,43	11,87	13,44
TR3-18	4112,9	4115,5	2474,7	4341,6	5,56		12,25	
125	3722	3725,9	2239,4	4060,4	9,09		18,58	
126	3805,4	3809,7	2108,6	4072,6	7,02	7,61	13,60	15,45
129	3841,4	3844,6	2279,1	4099,2	6,71		14,16	
207	3696	3699,5	2167,2	3983,9	7,79		15,85	
221	3745,2	3748,4	2195,3	4062,2	8,46	7,85	16,98	16,03
203	3816,7	3820,5	2272	4095	7,29		15,27	
309	3924,7	3927,5	2350,5	4178,8	6,47		13,90	
322	3956	3959,5	2319,4	4188,9	5,89	6,53	12,46	13,80
332	3921,5	3924,2	2324	4204,5	7,22		15,05	
419	3689,9	3692,8	2199,2	4045	9,62		19,24	
422	3800,2	3803,9	2130,2	4005,9	5,41	6,90	10,97	14,08
426	3866,9	3869,3	2265,3	4086,3	5,67		12,05	
528	3619,1	3624,2	2158,7	3961,2	9,45		18,98	
534	3680	3684,4	2170	4015,6	9,12	8,64	18,18	17,44
535	3623,9	3629,2	2134,9	3889,8	7,34		15,15	
676	3948,4	3950,7	2341	4214,9	6,75		14,22	
678	3887,9	3890,6	2244,7	4180,5	7,53	7,77	15,12	15,70
684	3659,1	3663	2131,9	3989,2	9,02		17,77	