

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS LONDRINA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

ISADORA GUIZILINI

**VIABILIDADE AMBIENTAL, TÉCNICA E ECONÔMICA DE REUSO DA
AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO NA PRODUÇÃO DE *PAVERS***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**LONDRINA
2017**

ISADORA GUIZILINI

**VIABILIDADE AMBIENTAL, TÉCNICA E ECONÔMICA DE REUSO DA
AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO NA PRODUÇÃO DE *PAVERS***

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de TCC2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de “Engenheiro Ambiental”.

Orientadora: Prof.^a Dra. Sueli Tavares de Melo Souza.

Co-orientadora: Prof.^a Dra. Tatiane Cristina Dal Bosco.

LONDRINA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

**VIABILIDADE AMBIENTAL, TÉCNICA E ECONÔMICA DE REUSO DA
AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO NA PRODUÇÃO DE *PAVERS***

por

ISADORA GUIZILINI

Monografia apresentada no dia 14 de junho de 2017 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____
(aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Dr. Thiago Melanda Mendes
(UTFPR)

Profa. Ma. Camila Zoe Correa
(UNOPAR)

Profa. Dra. Sueli Tavares de Melo Sousa
(UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

AGRADECIMENTOS

"É preciso viver o sonho e a certeza de que tudo vai mudar. É necessário abrir os olhos e perceber que as coisas boas estão dentro de nós, onde os sentimentos não precisam de motivos nem os desejos de razão. O importante é aproveitar o momento e aprender sua duração, pois a vida está nos olhos de quem sabe ver" (AUTOR DESCONHECIDO).

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pela saúde e proteção para enfrentar toda essa jornada, e me estender a mão nos momentos de dificuldade, mostrando que é apenas um caminho a ser vencido e que seu tempo e seus planos para minha vida são perfeitos!

Aos meus pais, Pedro Edson Guizilini, Elizete Ap. Rosa Guizilini, meu eterno amor e respeito, por me proporcionar o estudo, educação, os ensinamento e valores que são heranças insubstituíveis. Agradeço também aos meus irmãos, Juliana Guizilini Ajala, Pedro Henrique Guizilini e Caiubi Ajala, por todas as brigas, exigências, cumplicidade e união. O apoio de vocês é essencial na minha vida e agradeço toda a torcida e ajuda. Ao meu amigo, companheiro de muitos anos, Vitor Hugo Ribeiro, muito obrigada, por todo o amor, carinho, apoio, conselhos, broncas e ser exemplo de perseverança e coragem.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná como um todo, que por 6 anos foi minha segunda casa, e principalmente por proporcionar conhecer pessoas maravilhosas que guardarei sempre no meu coração e orações, meus amigos de sala, que ganhei para vida, do basquete, da Gaia Jr., do C.A e todos os professores que contribuíram para esta formação.

Gratidão à minha orientadora Sueli Tavares de Melo Souza por todo o aprendizado, experiência e amizade, que durante o período de TCC me conduziu, sanou dúvidas e permitiu conhecer e vivenciar diversas responsabilidades, novos conhecimentos, cenários e exigências que um profissional deverá enfrentar de maneira impecável. Todo o meu reconhecimento, muito obrigada!

À professora Tatiane Dal Bosco, obrigada, pelo apoio, orientação e dedicação exemplar, contribuindo para a melhoria da qualidade de ensino de seus alunos sempre.

Agradeço também as Empresas Parceiras pela colaboração, que sem estas o trabalho não teria sido tão rico e gratificante como foi. Em especial, aos

funcionários Paulo e Gevanildo, meu muito obrigada, por toda atenção, ajuda e experiência até os últimos momentos de execução deste trabalho.

*“Cada pedaço de terra é sagrado,
onde cada ramo brilhante de pinheiro,
cada punhado de areia das praias,
a penumbra na floresta,
cada clareira e inseto a zumbir
carregam consigo as lembranças
e experiências do homem...”*

Os rios são nossos irmãos...

*O murmúrio das águas é a voz de nossos ancestrais,
a água brilhante que escorre nos picos rochosos,
nos sulcos úmidos nas campinas, nos rios e riachos,
não é apenas a água que sacia a nossa sede,
mas o sangue de nossos antepassados...*

O ar é precioso...

*Todas as coisas compartilham o mesmo sopro:
o animal, a árvore e o homem.
O vento açucarado pelas flores dos prados,
perfumado pelos pinheiros,
que encrespa a face de um lago,
deu aos nossos antepassados,
o primeiro inspirar e o último respiro.*

*E se todas as plantas e animais se forem,
o homem morreria de uma imensa solidão de espírito,
pois tudo que acontecer à Terra,
também acontecerá aos filhos da Terra.
Todas as coisas estão ligadas,
como o sangue que une uma família.*

*O homem não tramou o tecido da vida:
ele é simplesmente um de seus fios...
A Terra não pertence ao homem...*

O homem pertence à Terra...”

RESUMO

GUIZILINI, ISADORA. **Viabilidade ambiental, técnica e econômica de reuso da areia descartada de fundição na produção de *pavers***. 2017. 69 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2. – Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. Londrina, 2017.

Dentre os processos industriais geradores de resíduos sólidos, se destacam as indústrias de produção de fundidos, onde um dos maiores problemas do setor é o descarte da areia de fundição (ADF) utilizada nos moldes das peças, também denominada como areia verde. Estas indústrias produzem em média 3 milhões de toneladas/ano de ADF. Em termos socioambientais, embora as indústrias de fundição sejam consideradas geradoras de passivos ambientais, a reutilização da ADF pode ser uma oportunidade para aliar a destinação correta desse resíduo e solucionar a problemática ambiental inerente. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de reuso de ADF na confecção de *pavers*, em termos ambientais, técnicos e econômicos. A viabilidade ambiental referiu-se à periculosidade do resíduo; a viabilidade técnica esteve relacionada à resistência mecânica dos *pavers* e a econômica, à possibilidade de aplicação desta ADF em larga escala, considerando custos e receitas. Foi necessário estabelecer parcerias com algumas empresas para executar as cinco etapas previstas neste trabalho: classificação do resíduo ADF, caracterização dos agregados, fabricação dos *pavers*, ensaios técnicos e análise da viabilidade econômica. Por meio de laboratório terceirizado obteve-se o resultado de classificação do resíduo ADF (NBR10004:2004), sendo considerado um resíduo Classe II A – Não Inerte. Para definir as proporções de ADF e demais agregados na fabricação dos *pavers*, caracterizou-se os agregados de modo a ajustar o traço baseando-se no de referência da empresa parceira. Após a fabricação das peças, com 8 e 6cm de espessura, realizou-se os ensaios técnicos exigidos pela norma NBR 9781:20013. Os resultados indicaram que tanto os *pavers* de referência quanto os com adição de ADF, de espessura de 6cm, apresentaram valores de resistência à compressão e absorção dentro dos limites estabelecidos pela norma. Em relação à análise dimensional, o *paver* com adição da ADF (6cm) não atendeu os limites de tolerância previstos para a espessura. Os *pavers* de referência (8 cm) também não atenderam a análise dimensional relativa à espessura, enquanto que os com adição de ADF não atenderam em relação à resistência aos 28 dias, previstas em norma. Em relação à viabilidade econômica do reuso da ADF, notou-se que seria possível a redução de custos para quem precisa descartá-la e para quem necessita da matéria-prima. Dessa forma, concluiu-se que a fabricação de *pavers* com a inserção de ADF de espessura de 6cm, atende as especificações técnicas para comercialização, é viável em relação ao reuso de modo que não impacte a saúde humana e meio ambiente, além de ser economicamente viável.

Palavras-chave: Caracterização de Agregados. Classificação do Resíduo. Resistência à compressão simples.

ABSTRACT

GUIZILINI, ISADORA. **Environmental, technical and economic feasibility of the reuse of sand casting discarded in the production of pavers**. 2017. 69 f. Completion of undergraduate course presented to the discipline Course Completion Work 2. - Environmental Engineering, Federal Technological University of Paraná, Câmpus Londrina. Londrina, 2017.

Among the industrial processes that generate solid waste, the most important are the melt production industries, where one of the biggest problems in the industry is the disposal of the sand casting (ADF) used in the molds of the pieces, also known as green sand. These industries produce an average of 3 million tons / year of ADF. In socio-environmental terms, although the foundry industries are considered to generate environmental liabilities, the reuse of the ADF may be an opportunity to combine the correct disposal of this waste and solve the inherent environmental problems. In this sense, this work had as objective to evaluate the feasibility of reuse of ADF in the making of pavers, in environmental, technical and economic terms. The environmental viability referred to the hazardousness of the residue; the technical feasibility was related to the mechanical resistance of the pavers and the economic feasibility, the possibility of applying this ADF in a large scale, considering costs and revenues. It was necessary to establish partnerships with some companies to carry out the five steps foreseen in this work: classification of the ADF residue, characterization of the aggregates, pavers manufacturing, technical tests and economic feasibility analysis. By means of an outsourced laboratory, the result of the classification of the ADF residue (NBR10004: 2004) was obtained, being considered a Class II A - Non Inert residue. In order to define the proportions of ADF and other aggregates in the pavers manufacturing, the aggregates were characterized in order to adjust the trace based on the reference of the partner company. After the manufacture of the pieces, with 8 and 6cm of thickness, the technical tests required by the norm NBR 9781: 20013 were realized. The results indicated that both reference and ADF pavers, with a thickness of 6 cm, presented values of resistance to compression and absorption within the limits established by the standard. Regarding the dimensional analysis, the paver with addition of the ADF (6cm) did not meet the tolerance limits predicted for the thickness. The reference pavers (8 cm) also did not comply with the dimensional analysis regarding the thickness, while those with ADF addition did not meet the resistance at 28 days, according to standard. Regarding the economic viability of ADF's reuse, it was noted that it would be possible to reduce costs for those who need to discard it and for those who need the raw material. Thus, it was concluded that the manufacture of pavers with the ADF insertion of 6cm thickness, meets the technical specifications for commercialization, is feasible in relation to reuse in a way that does not impact human health and environment, besides being economically viable.

Keywords: Characterization of Aggregates. Classification of Residual. Simple compression strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caracterização e classificação dos resíduos	9
Figura 2 – Hierarquia das ações do manejo de resíduos sólidos	11
Figura 3 – Exemplo de molde em processo de compactação da areia	15
Figura 4 – Processo de Fundição: (a) Separação do molde; (b) Retirada do molde por vibração; (c) Peça final	16
Figura 5 – Areia: (a) entrada do processo; (b) saída do processo	17
Figura 6 – Fluxograma das etapas do trabalho	23
Figura 7 – Agregados: (a) pedrisco; (b) pó de pedra; (c) areia media-grossa; (d) areia fina; (e) ADF	25
Figura 8 – Fases do ensaio de determinação da massa unitária: (a) materiais em estufa; (b) recipiente específico para ensaio; (c) exemplo do nivelamento do material; (d) recipiente específico para agregados maiores; (d) pesagem final	26
Figura 9 – Metodologia frasco de Chapman: (a) Frasco de Chapman; (b) Frasco com água e agregado; (c) Leitura Final	27
Figura 10 - Massa específica para agregados graúdos: (a) cesto vazio; (b) cesto com agregado	29
Figura 11 – Ensaio Pulverulento: (a) Lavagem do material; (b) Parada de lavagem – indicador Água de lavagem limpa; (c) material que sobrou em peneira; (d) material lavado e seco	30
Figura 12 – Ensaio de Granulometria: (a) pesagem inicial; (b) conjunto de peneiras; (c) exemplo de material retido em uma das peneiras; (d) resultado visual de separação do agregado por granulometria diferente	31
Figura 13 – Produção e equipamentos: (a) Silos com balanças automáticas; (b) esteira transportadora; (c) moldagem e prensa das peças; (d) correias transportadoras com bandejas; (e) câmaras de cura térmica	33
Figura 14 – Ilustração do <i>paver</i> e suas dimensões: (a) <i>paver</i> de 8cm; (b) <i>paver</i> de 6cm	34
Figura 15 – Teor de umidade: (a) coleta amostra; (b) secagem pelo método da frigideira	35
Figura 16 – Avaliação Dimensional: (a) comprimento; (b) largura; (c) espessura ou altura	36

Figura 17 – Ensaio Mecânico a compressão 7 dias: (a) máquina simples de compressão; (b) discos para ensaio; (c) disposição da peça; (d) ruptura; (e) área de compressão	37
Figura 18 – Ensaio Mecânico a compressão 28 dias: (a) capeamento; (b) saturação das peças; (c) maquina EMIC 2000 kN; (d) compactação	38
Figura 19 – Determinação da Absorção de água: (a) saturação das peças; (b) estufa de secagem; (c) pesagem seca	40
Figura 20 – Traço com inserção da ADF (8cm)	49
Figura 21 – Traço com inserção da ADF (6cm)	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de Fundidos (Ton.) 2015/2016	15
Tabela 2 - Resultados parciais do ensaio de Solubilização para a ADF	17
Tabela 3 - Resultados do ensaio de lixiviação	18
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de classificação ambiental NBR 10004:2004 realizados na amostra de ADF e na mistura de solo + 70% ADF	18
Tabela 5 – Análises no Resíduo Bruto	42
Tabela 6 – Análises do Extrato Lixiviado	42
Tabela 7 – Análises do Extrato Solubilizado	44
Tabela 8 – Resultados médios da massa unitária	45
Tabela 9 – Massa Específica Agregado Graúdo e Agregados Miúdos	46
Tabela 10 – Pulverulência	46
Tabela 11 – Composição Granulométrica do Pedrisco	47
Tabela 12 - Composição Granulométrica do Pó De Pedra	47
Tabela 13 – Composição granulométrica da Areia Meia-Grossa	48
Tabela 14 - Composição granulométrica da Areia Fina	48
Tabela 15 - Composição granulométrica da ADF	49
Tabela 16 – Resultado Teor de Umidade	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características técnicas conforme o uso do pavimento	21
Quadro 2 – Características do recipiente conforme NM 45:2006	26
Quadro 3 – Massa mínima de amostra de ensaio	28
Quadro 4 – Peneiras: Série para Material Graúdo e Miúdo	31
Quadro 5 – Amostragem para ensaio	36
Quadro 6 – Tolerâncias dimensionais das peças de concreto (mm)	37
Quadro 7 – Fator Multiplicativo p	39
Quadro 8 – Coeficiente de <i>Student</i> - (Nível de confiança de 80%)	39
Quadro 9 - Resultados <i>Paver</i> Referência (8cm) com Idade de 28 dias	51
Quadro 10 - Resultados <i>Paver</i> ADF (8cm) com Idade de 28 dias	52
Quadro 11 - Resultados <i>Paver</i> Referência (6cm) com Idade de 28 dias	53
Quadro 12 - Resultados <i>Paver</i> ADF (6cm) com Idade de 28 dias	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	7
2.1 OBJETIVO GERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3 REFENCIAL TEÓRICO	8
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS	8
3.1.1 Definição e conceitos	8
3.1.2 Gestão dos Resíduos Sólidos Industriais	10
3.1.3 Situação dos Resíduos Sólidos Industriais do estado do Paraná	12
3.2 RESÍDUO INDUSTRIAL: AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO	14
3.2.1 O processo de fundição	14
3.2.2 Definição da Areia de Fundição (ADF)	16
3.2.3 Classificação do resíduo de Areia de Fundição	17
3.3 BLOCO DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (PAVER)	19
3.3.1 Definição	19
3.3.2 Vantagens e desvantagens	20
3.3.3 Normas Técnicas para blocos de concreto para pavimentação	20
3.3.4 Fabricação das peças com reuso da ADF	21
4 MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE AMBIENTAL	23
4.1.1 Classificação do resíduo ADF	23
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E DA ADF	24
4.2.1 Determinação da massa unitária	25
4.2.2 Determinação da massa específica	27
4.2.3 Pulverulência	29
4.2.4 Granulometria	30
4.2.5 Ajuste do Traço	32
4.3 PRODUÇÃO DE PAVERS	32
4.3.1 Teor de umidade	34
4.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA	35
4.4.1 Inspeção visual	36
4.4.2 Avaliação Dimensional	36
4.4.3 Ensaio de Resistência Característica à Compressão Simples	37
4.4.4 Ensaio de Determinação da Absorção de Água	40
4.5 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO ADF	42
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E AJUSTE DE TRAÇOS	45
5.2.1 Ajuste dos Traços	49
5.2.2 Teor de Umidade	50
5.3 ENSAIOS TÉCNICOS ABNT NBR 9781/2013	50
5.3.1 Resultados Paver (8cm)	51
5.3.2 Resultados Paver (6cm)	53
5.4 RESULTADO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DA ADF	55
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Associado ao gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil, no ano de 2010, promulgou-se a Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), determinando a hierarquia a ser seguida para mitigar os impactos provenientes da geração dos resíduos sólidos nos países, sendo: não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento, bem como disposição final ambientalmente adequada de rejeitos. Para os resíduos sólidos industriais, aplica-se a mesma hierarquia, porém a disposição final se dá por meio de aterro sanitário específico, ou seja, o aterro industrial.

Dentre os processos industriais geradores de resíduos sólidos, se destacam as indústrias de produção de fundidos, onde um dos maiores problemas do setor é o descarte da areia de fundição (ADF) utilizada nos moldes das peças, também denominada como areia verde. No Brasil, estas indústrias produzem em média 3 milhões de toneladas/ano de ADF, segundo a Associação Brasileira de Fundição – ABIFA (ASSOCIAÇÃO..., 2015). A disposição final desse material se dá em aterros industriais, o que diminui a vida útil dos mesmos e potencializa o uso de áreas produtivas, habitáveis e/ou preservadas para a construção de aterros.

Em termos socioambientais, embora as indústrias de fundição sejam consideradas geradores de passivos ambientais, a reutilização da ADF pode ser uma oportunidade de aliar uma destinação correta desse resíduo e de solucionar uma problemática ambiental. Vale destacar que a ADF já é enviada para aterros específicos, o que implica também na oneração dos custos de produção das indústrias deste seguimento.

Neste sentido, a incorporação de resíduo em produtos manufaturados tem despertado interesse, tendo em vista o atendimento à legislação e o potencial econômico inerente ao processo de reutilização de resíduos. Os resultados obtidos em ensaios específicos comprovam que a ADF pode ser considerada uma matéria-prima para diversos setores produtivos, como para a produção de blocos de concreto (AVRELLA et al., 2015), argamassa (NOVAIS; RIBEIRO, 2013), cobertura de aterros sanitários (DOMINGUES, 2015) e para a fabricação de *pavers* (PIOVESAM et al., 2008).

O bloco de concreto para pavimentação, comumente conhecido como *paver*, pode constituir-se em uma alternativa atraente para o reuso da ADF, pois é um produto cada vez mais procurado para a pavimentação de áreas externas.

No panorama atual do desenvolvimento sustentável existe dentro do ciclo produtivo o consumo de matéria prima, que para o setor da construção civil refere-se à extração de areia natural, implicando na escassez dos recursos naturais. Por isso, a substituição da areia natural por areia de fundição contribui para minimizar os efeitos da extração, atividade sabidamente impactante, na depreciação da qualidade das águas, incidência de processos erosivos, supressão da vegetação nativa presente às margens do local de exploração e alterações na geomorfologia fluvial dos cursos d'água (MELO, 2010).

Neste contexto, este trabalho buscou avaliar a viabilidade do reuso de ADF na fabricação de *pavers*, considerando aspectos técnicos de resistência mecânica, ambientais quanto à periculosidade do resíduo e econômicos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Produzir *pavers* com inserção de Areia de Fundição que atendam as especificações técnicas contidas em normas brasileiras de modo a ser comercializado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Classificar a ADF quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente segundo a ABNT NBR 10004:2004, de modo a avaliar sua viabilidade ambiental no reúso;
 - Ajustar o traço convencional do *paver* com a inserção do resíduo ADF;
 - Produzir os *pavers* com a inserção do resíduo ADF;
 - Ensaiair os *pavers*, conforme a Norma Brasileira ABNT NBR 9781:2013, de modo a verificar sua viabilidade técnica;
 - Avaliar as vantagens e desvantagens técnicas do reuso do resíduo ADF na fabricação de *pavers*.
- Verificar a viabilidade econômica tanto para a empresa geradora do resíduo quanto por parte da empresa absorvedora na forma de matéria prima.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

3.1.1 Definição e conceitos

A problemática dos resíduos sólidos é pauta de muitas discussões nas últimas décadas. O manejo inadequado destes pode causar inúmeros impactos socioambientais negativos, tais como: degradação e contaminação do solo, proliferação de vetores, poluição do ar, dos recursos hídricos e a desvalorização econômica. Perante essas potencialidades de danos à saúde humana e exploração do meio ambiente, surge a necessidade de implementar políticas públicas eficientes.

A Lei 12.305/2010 (BRASIL 2010a) instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sendo, portanto, considerada um importante marco regulatório ambiental, por estabelecer objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações a serem adotados no país. Esta lei foi regulamentada pelo Decreto nº 7.405/2010 (BRASIL, 2010b). Em seu Artigo 13, o mesmo define resíduos industriais como sendo “todo aquele resíduo gerado por meio de atividades, processos produtivos e instalações industriais”.

A Resolução CONAMA 313/2002, que dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, define resíduo sólido industrial (RSI) como:

“Todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semi-sólido, gasoso - quando contido, e líquido - cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Incluindo lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição” (BRASIL, 2002).

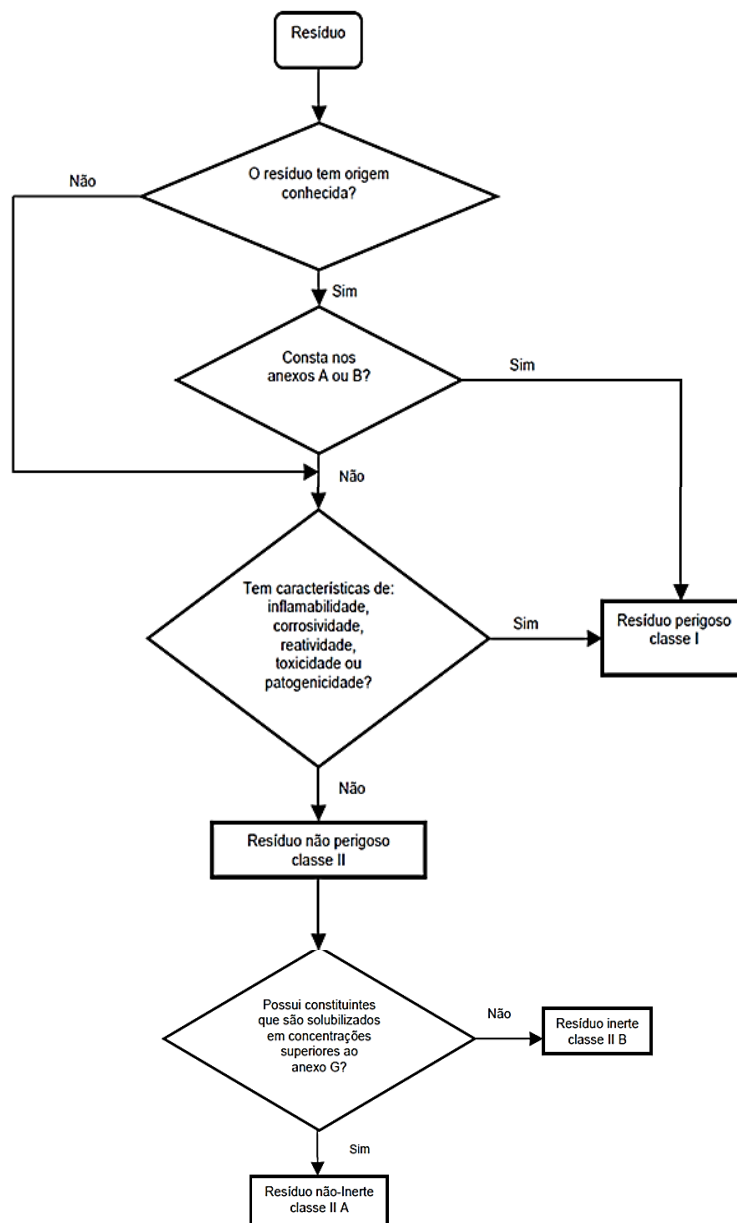
As atividades industriais geram diferentes tipos de resíduos, com diversas características. Estes resíduos são originados dos diferentes ramos industriais, tais como: metalúrgico, químico, celulose e papel, alimentício, mineração, entre outros. Segundo Tocchetto (2009) os resíduos industriais podem ser representados por:

“Resíduos de processo, resíduos de operações de controle de poluição ou descontaminação, materiais adulterados, materiais e substâncias resultantes de atividades de remediação de solo contaminado, resíduos da purificação de matérias-primas e produtos, cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros e cerâmicas (Tocchetto, 2009).

Entre os resíduos industriais encontram-se quantidades expressivas de materiais perigosos (em torno de 40%), que necessitam de tratamentos específicos devido ao seu alto potencial de impacto ambiental e à saúde (TOCCHETTO, 2009).

A partir deste contexto, a Norma Brasileira NBR 10004:2004 estabelece uma classificação dos resíduos sólidos de acordo com suas características e particularidades (Figura 1), levando em consideração a matéria-prima, os insumos e o processo que lhes deram origem, a comparação destes com a listagem de resíduos e substâncias contidas nos anexos A e B da norma (ABNT, 2004a).

Figura 1 – Caracterização e classificação dos resíduos.



Fonte: ABNT (2004).

No mesmo contexto, a NBR 10005:2004 (ABNT, 2004b) estabelece o procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos, ou seja, determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator, visando assim, diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004:2004 como classe I – perigosos – e classe II – não perigosos (ABNT, 2004).

A NBR 10.006:2004 (ABNT, 2004c) determina o procedimento para se obter o extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando à diferenciação dos resíduos classificados nas classes de não inertes (classe IIA) ou inertes (classe IIB) segundo a ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004).

Por fim, a NBR 10.007:2004 (ABNT, 2004 d) define as condições de amostragem, preservação, estocagem de amostras de resíduos sólidos, pré-caracterização do resíduo, plano de amostragem e cuidados de segurança.

3.1.2 Gestão dos Resíduos Sólidos Industriais

O aumento do consumo de bens e serviços no país implica diretamente nos impactos ambientais, visto que a demanda de matéria prima cresce e, por consequência, tem-se a extração de mais recursos naturais para suprir as necessidades das fases de produção, resultando no aumento da geração de resíduos, seja eles urbanos ou industriais. Neste contexto, os resíduos industriais vêm sendo destinados, muitas vezes, de maneira inadequada no Brasil como mostra o Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais elaborado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012).

Por outro lado, a gestão integrada dos resíduos sólidos é definida como o “conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com a premissa do desenvolvimento sustentável”. Segundo a PNRS, os consumidores, fabricantes, distribuidores, comerciantes, importadores e governo são responsáveis pelos resíduos desde a produção até o descarte (BRASIL, 2014a).

No tocante aos resíduos sólidos industriais, a PNRS (BRASIL, 2010a) prevê obrigações para o setor produtivo. O gerenciamento adequado dos Resíduos Sólidos Industriais influencia na expansão da infraestrutura econômica e social do país. Portanto, a Lei 12.305/2010 obriga os grandes empreendedores a manterem

uma ordem de ações (Figura 2), iniciando na não geração e finalizando com a disposição final apenas de rejeitos em aterros sanitários, priorizando ações de redução, reuso e a reciclagem dos resíduos, incentivando desta forma a inclusão socioeconômica dos catadores de materiais recicláveis, e conseqüentemente, a preservação dos recursos naturais não renováveis (BRASIL, 2010a).

Figura 2– Hierarquia das ações do manejo de resíduos sólidos.



Fonte: Brasil (2014, p. 8).

A Resolução Conama nº 313/2002 (BRASIL, 2002) dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, desenvolvido para a coleta de informações sobre a geração, as características, o armazenamento, o transporte, o tratamento, a reutilização, a reciclagem, a recuperação e a disposição final dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias do país.

Este Inventário possui informações atualizadas das atividades industriais, fornecendo ao Estado o conhecimento real da situação dos resíduos, e cumpre seu papel auxiliando na elaboração de diretrizes para o controle e gerenciamento dos RSIs.

Todas as indústrias estão sujeitas à elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), que é parte integrante do processo de licenciamento ambiental do empreendimento ou atividade. Além do PGRS, as indústrias também devem prestar informações sobre seus resíduos pelo Cadastro Técnico Federal (CTF) do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), conforme a Lei nº 10.165/2000 (BRASIL, 2000). Isto acontece com todas as pessoas jurídicas que realizam atividades potencialmente poluidoras ou usufruem de recursos naturais.

3.1.3 Situação dos Resíduos Sólidos Industriais do estado do Paraná

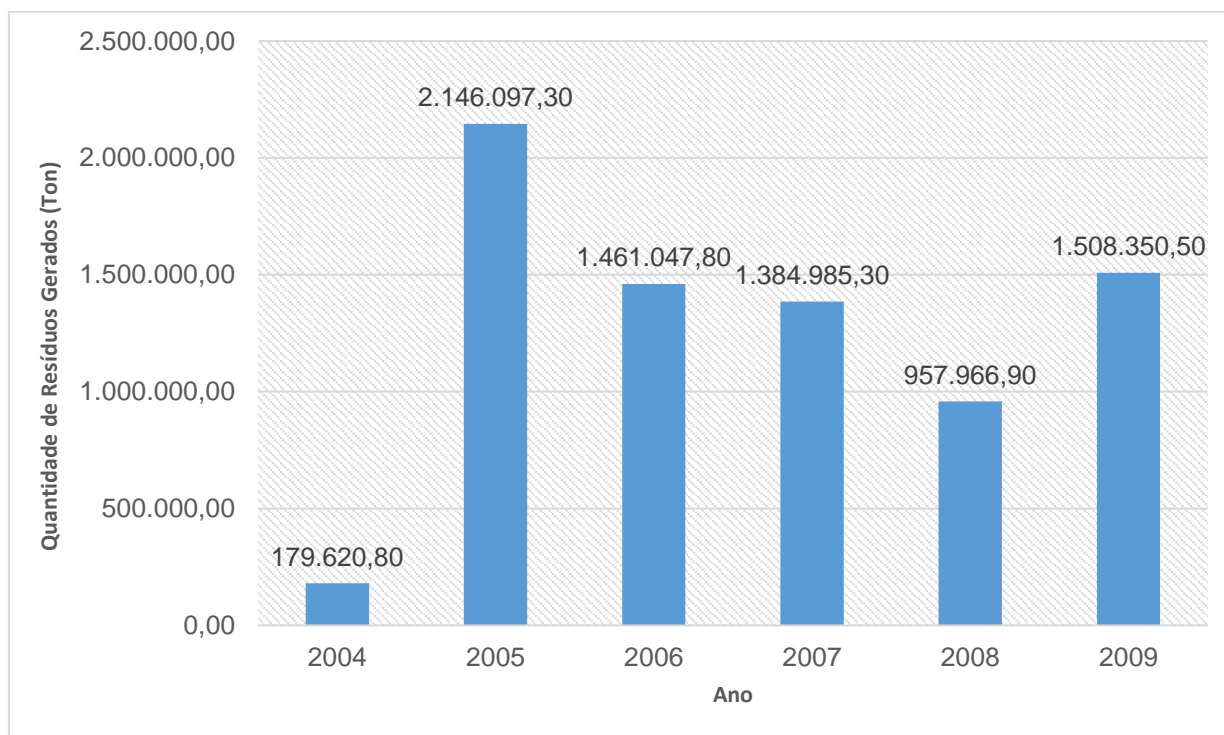
No ano de 2012 foi elaborado o Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) como subsídio ao processo de discussão e elaboração do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, sob a coordenação do Ministério do Meio Ambiente.

Neste diagnóstico são apresentados dados dos inventários de resíduos industriais de diversos estados do país, mediante a consulta em sites de diversos órgãos ambientais estaduais, dando destaque ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP).

A última versão desse inventário, atualizada pelo IAP, apresenta dados referentes à quantidade de resíduos industriais gerados, no período de janeiro de 2004 a maio de 2009 (Gráfico 1).

Segundo os inventários fornecidos pelas indústrias, a quantidade de resíduos não perigosos e perigosos, gerados entre 2004 e 2009, foi de 7.638.069 ton.

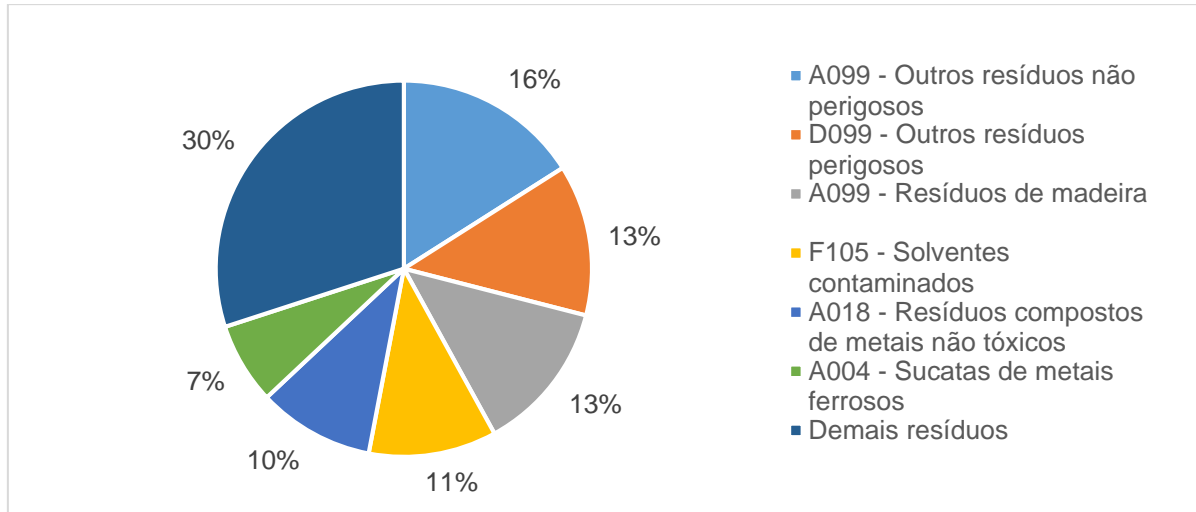
Gráfico 1 - Quantidade de resíduos gerados (TON) – Paraná (2004-2009)



Fonte: IAP (2009).

Os principais tipos de resíduos gerados foram classificados conforme a Resolução Conama nº 313/2002, como mostrado no Gráfico 2.

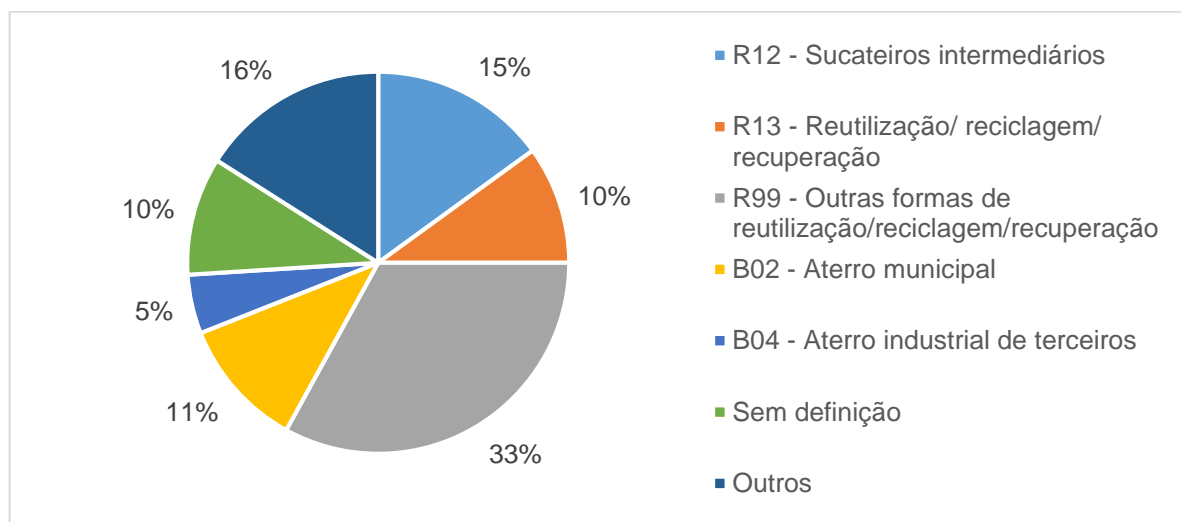
Gráfico 2 – Principais tipos de resíduos inventariados - Paraná



Fonte: IAP (2009).

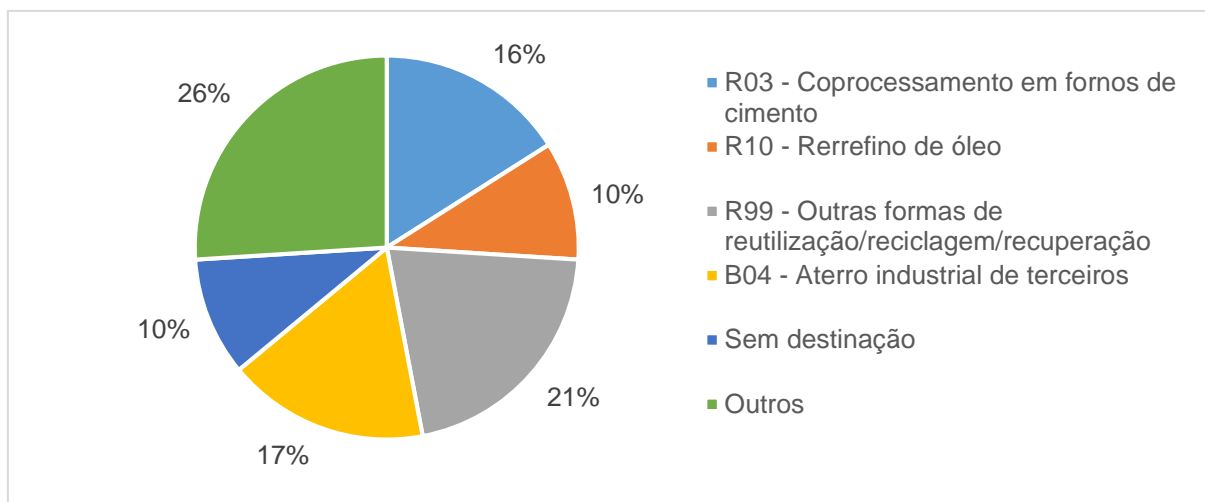
Em relação ao cenário de disposição final dos resíduos, tem-se os dados fornecidos pelos inventários 2004-2009, cuja principal destinação dos resíduos industriais classificados como não perigosos, foi para outras formas de reciclagem/reutilização/recuperação (33%), seguida por sucateiros intermediários (15%) e aterro municipal (11%) (Gráfico 3). Para os resíduos industriais perigosos, a principal destinação se deu por reutilização/reciclagem/recuperação (21%), seguida por aterro industrial terceirizados (17%) e coprocessamento em fornos de cimento (16%). Os 26% restantes fazem referência a outros tipos de destinações (Gráfico 4).

Gráfico 3 - Principais destinações para os resíduos não perigosos – Paraná



Fonte: IAP (2009).

Gráfico 4 – Principais destinações para os resíduos perigosos – Paraná.



Fonte: IAP (2009).

Concluiu-se que os principais tipos de destinações dos resíduos inventariados entre os anos de 2004 e 2009 foram os sucateiros intermediários e outras formas de reciclagem/reutilização/recuperação. Portanto, faz-se necessário a avaliação dos processos empregados de reciclagem/reutilização/recuperação e quais são os principais tipos reciclados.

É importante ressaltar que somente no estado do Paraná, 10% dos resíduos classificados como perigosos não possuem destinação, resultando em impactos diretos de contaminação e degradação do meio ambiente, sendo necessárias políticas, pesquisas e ações para o tratamento desses resíduos específicos.

3.2 RESÍDUO INDUSTRIAL: AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO

3.2.1 O processo de fundição

A chegada dos imigrantes no Brasil deu início ao processo de fundição no país, do qual o ferro era matéria-prima para a confecção de seus instrumentos de trabalho nas lavouras. No início do século XVIII, o ferro já começava a se tornar indispensável para a fabricação de utensílios como fechaduras, pregos, enxadas, foices, pás e armas (ASSOCIAÇÃO..., 1989).

Segundo dados da ABIFA (Associação Brasileira de Fundição) (2015) o Brasil ocupava no ano de 2015, o 7º lugar entre os produtores mundiais de fundidos,

produzindo quase 4 milhões de toneladas/ ano. Em 2016 houve uma redução no setor (Tabela 1).

Tabela 1 - Produção de Fundidos (Ton.) 2015/2016.

Período	SET/16	AGO/16	SET/15	A/B %	A/C%	JAN- SET/16	JAN- SET/15	D/E
Metal	(A)	(B)	(C)			(D)	(E)	%
1 - FERRO TOTAL	158.109	162.466	144.843	2,7	9,2	1.342.955	1.501.964	10,6
2 - AÇO TOTAL	13.538	14.794	22.353	8,5	39,4	119.966	194.121	38,2
3 - NÃO FERROSOS	14.469	15.160	14.104	4,6	2,6	122.666	143.956	14,8
3.1 – Cobre	1.814	2.015	1.466	10	23,7	16.677	17.443	4,4
3.2 – Zinco	142	131	71	8,4	100	1.003	979	2,5
3.3 - Alumínio	12.009	12.487	12.150	3,8	1,2	100.559	121.890	17,5
3.4 - Magnésio	504	527	417	4,4	20,9	4.427	3.644	21,5
4 - TOTAL GERAL	186.116	192.420	181.300	3,3	2,7	1.585.587	1.840.041	13,8

Fonte: ABIFA (2016).

O processo de fundição consiste no derretimento de um metal, em estado líquido, vazado em um molde e que, ao se solidificar, gera uma peça com o formato desejado. As peças são obtidas por meio da moldagem, geralmente em areia verde, em processo de compactação da areia sobre o modelo (Figura 3). Normalmente este é bipartido, de modo a facilitar a remoção do padrão (FACUNDES; VAZ; OLIVEIRA, 2009).

Figura 3 – Exemplo de molde em processo de compactação da areia.

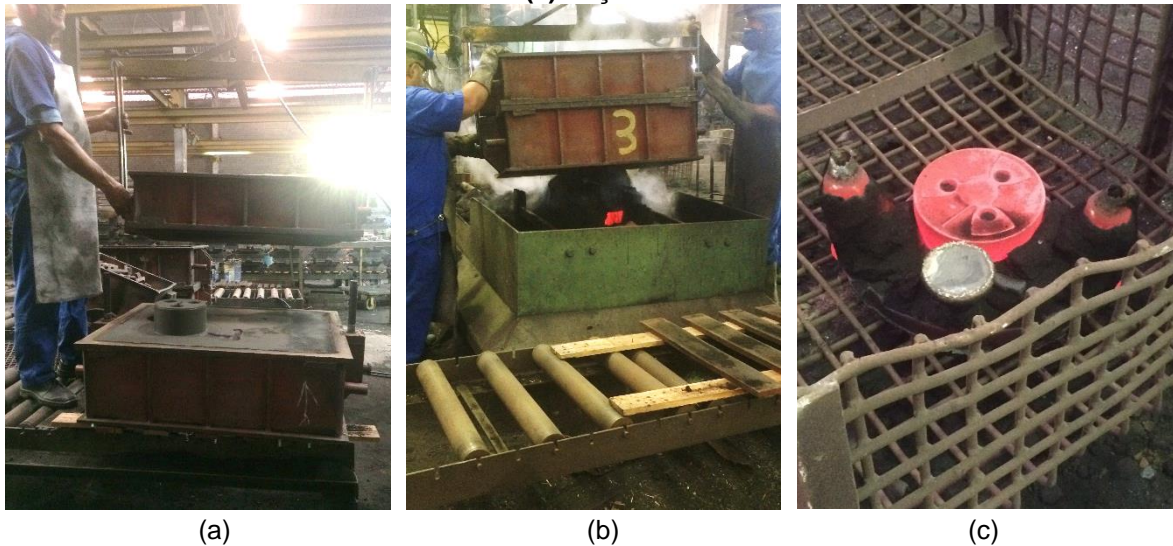


Fonte: Autoria própria (2016).

O metal fundido é vertido na cavidade do molde. A areia que entrou em contato com o metal fundido é sinterizada. Após a solidificação do metal, o molde é separado das peças fundidas por meio de máquinas vibratórias, conforme ilustrado na Figura 4. Assim, o resíduo gerado neste processo é a porção de areia queimada,

que pode ser inserida no processo novamente inúmeras vezes, até ser descartada (FACUNDES; VAZ; OLIVEIRA, 2009).

Figura 4 – Processo de Fundição: (a) Separação do molde; (b) Retirada do molde por vibração; (c) Peça final.



Fonte: Autoria própria (2016).

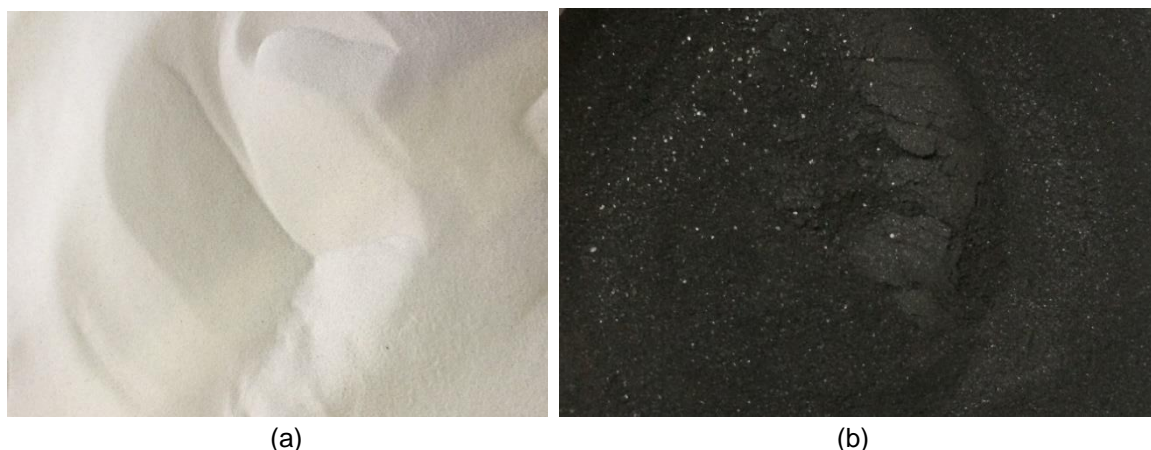
3.2.2 Definição da Areia de Fundição (ADF)

A ADF é um subproduto da indústria de fundição de materiais ferrosos e não ferrosos. Essas indústrias empregam areia para a confecção de moldes, machos e núcleos para a fabricação de peças de metal, e, durante o processo como um todo, a areia é reutilizada inúmeras vezes até ser descartada e designada como ADF (KOFF et al., 2010 apud ALVES, 2012, p1).

A ADF geralmente é composta por areia, água, carvão e bentonita. A bentonita é inserida com intuito de manter a estabilidade térmica nos moldes das peças e o carvão para melhorar o acabamento, resultando em superfícies mais lisas.

As areias verdes apresentam coloração preta devido à presença de material carbonáceo e contêm grande porcentagem de partículas finas ($< 150 \mu\text{m}$), logo o termo verde não está relacionado à cor e não representa uma produção mais limpa. Ao adicionar água na mistura tem-se a “resistência verde”, que é a capacidade de um material parcialmente curado submeter-se à remoção do molde e ser manipulado sem distorção (SIDDIQUE; KAUR; RAJOR, 2010). Na Figura 5 mostra a modificação da areia inserida no processo de fundição.

Figura 5 – Areia: (a) entrada do processo; (b) saída do processo.



Fonte: Autoria Própria (2016).

3.2.3 Classificação do resíduo de Areia de Fundição

Conhecer as características da ADF permite determinar estratégias de gerenciamento, buscando garantir a curto, médio e longo prazo, a preservação do meio ambiente, bem como manter a empresa em conformidade com os requisitos legais.

Nesse sentido, as seguintes normas referentes à periculosidade: NBR 10.004 - Resíduos Sólidos – Classificação: Classe I (perigosos), Classe II-A (não inertes) e Classe II-B (inertes); NBR 10.005 - Lixiviação de Resíduos – Procedimentos; NBR 10.006 - Solubilização de Resíduos Sólidos – Métodos de ensaios; NBR 10.007 - Amostragem de Resíduos – Procedimentos, constituem ferramentas significativas para o gerenciamento do resíduo industrial ADF.

Segundo Klinsky e Fabbri (2009) nos ensaios de Lixiviação (NBR 10005:2004 – Anexo F) e de Massa Bruta (NBR 10004:2004), a ADF apresentou parâmetros dentro dos limites permitidos; já no ensaio de Solubilização, a amostra excedeu os limites permitidos pela 10006:2004 – Anexo G, conforme pode ser observado na Tabela 2. Em função dos resultados desses ensaios, a amostra de ADF foi classificada como Classe II A – Resíduo Não Perigoso e Não Inerte.

Tabela 2 - Resultados parciais do ensaio de Solubilização para a ADF

Parâmetros	Unidade	LQ*	Resultados Analíticos	ABNT NBR 10004:2004 VMP**
Índice de Fenóis	mg/L	0,002	0,06	0,01
Manganês	mg/L	0,01	0,0114	0,1

LQ* Limite de Quantificação

VMP** Valor Máximo Permitido pela Norma

Fonte: Klinsky, Fabbri (2009).

Bittencourt (2012) também realizou os mesmos ensaios em uma amostra de ADF e verificou que, com exceção do bário e fluoretos, não foram detectadas outras substâncias acima dos teores permitidos por norma, tratando-se de uma areia quartzosa industrial, de Classe IIA, não inerte e não perigosa, sendo, portanto, permitido o seu reuso para fins de artefatos de concreto.

Em amostras com misturas de ADF, analisadas por Avrella et al. (2015), nenhum dos elementos presentes ultrapassou o limite máximo indicado pela norma técnica (Tabela 3), classificando as amostras, desta forma, como Resíduo Não Perigoso-Não Inerte (Classe IIA).

Tabela 3 - Resultados do ensaio de lixiviação

		Elementos Analisados							
		Cd	Cr Total	Pb	As	Se	Ag	Ba	Hg
		Limite Máximo NBR 10.004 (mg/L)							
		0,5	5	1	1	1	5	70	0,1
Amostras	Valores Medidos (mg/L)								
10%	< 0,002	0,07	< 0,01	< 0,02	0,04	0,03	0,25	ND	
20%	< 0,002	0,02	< 0,01	< 0,02	0,03	0,03	0,24	ND	

ND - Não Detectado

Fonte: Avrella et al. (2015).

Domingues (2015) realizou ensaios de caracterização em amostra de ADF e estabeleceu uma mistura de solo + 70% ADF utilizada na cobertura de aterros sanitários, e ambas não apresentaram potencial contaminante ou tóxico (Tabela 4), o que confirma a viabilidade de reuso destes materiais. Ressalta-se que no parâmetro de extrato solubilizado, a quantidade do componente Alumínio (Al) e o índice de fenóis ultrapassam os limites máximos permitidos. Estes resultados indicam que a segregação da ADF na indústria fornecedora da amostra não foi adequada, causando a contaminação com materiais fenólicos (orgânicos). Já para o extrato lixiviado, todos os parâmetros satisfazem os limites máximos permitidos pela norma.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de classificação ambiental NBR 10004:2004 realizados na amostra de ADF e na mistura de solo + 70% ADF.

NBR 10004:2004 - Massa Bruta (mg kg ⁻¹)				
Parâmetros	LQ*	ADF	Solo+70%ADF	VMP** NBR
pH (Suspensão 1:1)	0 -14	9,9	7,5	2,0 - 12,5
Sulfeto (como H ₂ S)	1	<1	<1	500
Cianeto (como HCN)	0,1	<0,1	0,3	250

NBR 10005:2004 - Extrato Lixiviado (mg L⁻¹)				
Parâmetros	LQ*	ADF	Solo+70%ADF	VMP** NBR
Arsênio	0,01	<0,01	<0,01	1
Bário	0,01	1,8	0,181	70
Cádmio	0,001	<0,01	<0,001	0,5
Chumbo	0,01	<0,01	0,265	1
Cromo	0,00005	0,067	0,015	5
Mercúrio	0,01	<0,00005	<0,00015	0,1
Prata	0,01	<0,01	<0,01	5
Selênio	0,008	<0,008	<0,008	1
NBR 10006:2004 - Extrato Solubilizado (mg L⁻¹)				
Parâmetros	LQ*	ADF	Solo+70%ADF	VMP** NBR
Cloreto	1	16,1	3,9	250
Fluoreto	0,1	<0,25	<0,1	1,5
Nitrato (N)	0,2	1	0,2	10
Sulfato	1	57,4	48,5	250
Alumínio	0,01	0,499	1,1	0,2
Arsênio	0,01	<0,01	<0,01	0,01
Bário	0,01	0,029	<0,01	0,07
Cádmio	0,001	<0,001	<0,001	0,005
Chumbo	0,01	<0,01	<0,01	0,01
Cianeto	0,05	<0,05	<0,05	0,07
Cobre	0,005	<0,005	<0,001	2
Cromo	0,01	<0,01	<0,01	0,05
Ferro	0,01	0,27	0,927	0,3
Índice de Fenóis	0,05	0,17	0,065	0,01
Manganês	0,01	0,064	0,021	0,1
Mercúrio	0,00005	<0,00005	<0,00005	0,001
Prata	0,01	<0,01	<0,01	0,05
Selênio	0,008	<0,008	<0,008	0,01
Sódio	0,5	52,6	34,4	200
Surfactantes (LAS)	0,1	0,17	0,52	0,5
Zinco	0,01	<0,01	0,033	5

LQ*: Limite de Quantificação da Amostra (LQ = LQM x fator de preparo da amostra x correção base seca, quando aplicável); VMP**: Valores Máximos Permitidos pela Norma; Un. = Unidade; Qtd. = Quantidade.

Fonte: Domingues (2015).

3.3 BLOCO DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (PAVER)

3.3.1 Definição

Os blocos de concreto para pavimentação, comumente conhecidas como *pavers*, são peças pré-moldadas de concreto utilizadas em ruas, calçadas ecológicas, áreas de recreação, calçadões e praças. São empregados em grande

escala no Brasil, tanto na construção quanto na revitalização de instalações urbanas (BITTENCOUR, 2012).

Os blocos atingem a qualidade das peças pré-moldadas em concreto, quando suas dimensões são uniformes e atingem a resistência e especificações previstas em normas brasileiras. Os *pavers* possuem diferentes formas, cores e texturas, e uma variável forma nos padrões de assentamento, permitindo diversificar projetos arquitetônicos e paisagísticos (BITTENCOUR, 2012).

Segundo Hallak (1998) e ABCP (1999) este revestimento deve ser capaz de suportar as cargas e as tensões provocadas pelo tráfego, protegendo a camada de base do desgaste por abrasão com baixos níveis de umidade.

3.3.2 Vantagens e desvantagens

O *paver* possui inúmeras vantagens em seu uso, quando confrontadas às demais técnicas de pavimentação. Segundo Bittencour (2012) uma delas está relacionada à economia de energia em sua fabricação, se comparados ao pavimento asfáltico, pois estes proporcionam maior uniformidade dimensional e são produzidas a partir de matéria prima com menor custo e não com derivados de petróleo.

Outra vantagem citada pela pesquisadora está relacionada à resistência à derrapagem (igual ou maior que os demais pavimentos), o grande número de cores, texturas e formas. Além de sua capacidade estrutural, ótima aparência, alta resistência a óleos e ao derramamento de combustíveis, por isso seu uso é indicado para áreas portuárias e industriais. Por fim, pode ser aplicado em diferentes formas de relevos.

Sabe-se que todo pavimento precisa de um assentamento bem dimensionado e que exige uma base bem-feita, além de mão de obra especializada, acarretando em aumento no custo final da obra. Deve-se ter cuidado com a base, pois este pavimento se deforma com maior facilidade (HALLACK, 2001).

3.3.3 Normas Técnicas para blocos de concreto para pavimentação

Atualmente as peças de concreto utilizadas na pavimentação são regulamentadas por três normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): a NBR 9780/1987, que determina os padrões de resistência à compressão;

a NBR 9781/2013, que estabelece os requisitos e normas específicas para aceitação das peças de concreto para a pavimentação sujeita ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumático e áreas de armazenamento de produtos e a NBR 15953/2011 – Pavimento Intertravado com peças de concreto – Execução.

O Quadro 1 mostra as aplicações utilizando *pavers* com espessuras de 6, 8 e 10 cm e suas respectivas resistências características à compressão.

Quadro 1 – Características técnicas conforme o uso do pavimento.

Espessura	Aplicação	Resistência característica à compressão (f_{pk}) aos 28 dias MPa
6 cm	Calçadas, praças, pátios, áreas de lazer, corredores, etc.	≥ 35
8 cm	Ruas e avenidas de tráfego moderado, postos de combustível urbanos, estacionamentos, etc.	≥ 35
10 cm	Corredores de ônibus, postos de combustível em estradas, pedágios, etc.	≥ 35
8 cm ou 10 cm	Portos, pátios de indústria pesada, aterros de resíduos de construção e outros locais onde o pavimento sofra com desgaste por alto atrito.	≥ 50

Fonte: Adaptado de ABNT (2013).

3.3.4 Fabricação das peças com reuso da ADF

Para alguns autores o reuso configura como uma das alternativas de tratamentos que reintroduz resíduos ou rejeitos em um processo produtivo, visando maior eficiência no gerenciamento dos resíduos, auxiliando na mitigação dos espaços em aterros sanitários, reduzindo o consumo de energia e contribuindo para a economia dos recursos naturais não renováveis (PINHEIRO; FRANCISCHETTO, 2016).

O estudo do reuso da ADF decorre do volume gerado e do alto custo de deposição, onde devem ser consideradas a retirada dos resíduos até a destinação final. Quando somados aos prejuízos causados ao meio-ambiente, devido à destinação inadequada e esgotamento do volume útil dos aterros, torna-se necessário a reutilização deste resíduo industrial (BRODINO, SILVA, BRONDINO, 2014).

Piovesan et al. (2008) fabricaram blocos de pavimentação (*paver*) com a incorporação da ADF substituindo a areia fina. Foram utilizados dois traços com proporções diferentes e os ensaios de resistência aconteceram aos 7, 14 e 28 dias de cura. Com base nos ensaios de resistência à compressão, percebeu-se um ganho de resistência nas primeiras idades, em todos os traços, e aos 28 dias, atingiu 35 MPa, ou seja, mesmo desempenho exigido em norma, o que demonstra a viabilidade da utilização da ADF.

Carnin et al. (2010) realizaram um estudo utilizando a ADF como agregado na confecção de peças de concreto para pavimentação. Segundo os autores, as peças tiveram excelente acabamento, ideal para a pavimentação de calçadas, ruas de baixo tráfego e espaços urbanos. A partir dos ensaios mecânicos, avaliou-se que os blocos atingiram as especificações da norma. O método de envelhecimento acelerado também foi realizado com base na norma ABNT – NBR 13554:1996 (ABNT, 1996). Este método consiste em ensaios de expansão através de ciclos de molhagem e secagem, o qual visa observar a durabilidade das peças, ressaltando que neste estudo não foram observadas deformabilidade nas peças.

No estudo feito por Bittencourt (2012) foram fabricados *pavers* utilizando inicialmente agregados reciclados (brita e areia), provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), e posteriormente com inserção de ADF na sua composição. Os resultados da substituição por 20 e 40% de ADF, alteraram o comportamento mecânico dos *pavers*, reduzindo a resistência à compressão.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em cinco etapas, apresentadas na Figura 6.



Fonte: Autoria Própria (2017).

4.1 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE AMBIENTAL

4.1.1 Classificação do resíduo ADF

A ADF foi disponibilizada pela empresa MGL Mecânica de Precisão, uma empresa do ramo de usinagem de produtos em ferro fundido cinzento e nodular, localizada na cidade de Cambé – PR. Sua geração é em torno de 30 a 40 toneladas/mês deste resíduo.

Os ensaios referentes à classificação do resíduo ADF foram realizados pela empresa MGL, por meio de laboratório terceirizado acreditado pela norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 (ABNT, 2005). As referências utilizadas foram: 22ª Edição “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*”; US *Environmental Protection Agency*; Procedimentos internos baseados em normas da

ABNT/CETESB; NBR 10004 (Classificação de Resíduos) (ABNT, 2004a); NBR 10005 (Lixiviação de Resíduos) (ABNT, 2004b); NBR 10006 (Solubilização de Resíduos) (ABNT, 2004c); NBR 10007 (Amostragem de resíduo sólido) (ABNT, 2004d).

Em síntese, o ensaio de Lixiviação consiste no preparo de uma mistura composta por uma massa seca da amostra (100 g), misturada a 2000 cm³ de Solução de Extração (escolhida de acordo com o pH da amostra bruta). Esta mistura entra em processo contínuo de agitação durante 18 ± 2 horas, a uma temperatura de até 25°C. E após o tempo de agitação, a amostra é filtrada à vácuo em filtro com porosidade de 0,6 a 0,8 µm, compondo assim, o Extrato do Lixiviado, seguindo para análise química.

Para o Extrato de Solubilização, uma massa seca de 250g do resíduo, deve ser misturada em 1000 cm³ de água deionizada e isenta de orgânicos. Agita-se esta mistura por 5 minutos, em seguida a mesma repousa durante 7 (sete) dias, em temperatura até 25°C. Após o repouso, esta mistura é filtrada em membrana com porosidade de 0,45 µm, compondo assim, o Extrato de Solubilização, para a análise química.

Após a realização dos ensaios, os resultados foram comparados com os limites estipulados pela NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), de forma a validar a classificação do Resíduo ADF.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E DA ADF

Os agregados são materiais de suma importância na formulação de concretos, pois afetam significativamente a durabilidade e o desempenho no estado fresco e endurecido.

Para Costa (2016) a aplicação dos agregados em concretos, exige alguns requisitos básicos que devem ser considerados, como por exemplo:

“O processo de extração e beneficiamento devem proporcionar, dentro de certos limites, características homogêneas; características físicas e mecânicas devem ser compatíveis com o tipo de mistura a ser produzido; características químicas e mineralógicas devem ser estáveis, devendo apresentar uma mínima reatividade com produtos hidratados do cimento, com a água ou o ar ou ainda outros constituintes dos concretos” (COSTA, 2016).

Dada à importância dos agregados no desempenho final do produto, foi necessário realizar os ensaios de caracterização (determinação da massa unitária, determinação da massa específica, pulverulência e granulometria) para o pedrisco, areia artificial (conhecido também como pó de pedra), areia media-grossa, areia fina e ADF (Figura 7), de modo a auxiliar os ajustes do traço com a inserção desses materiais. Os ensaios foram realizados no laboratório de Engenharia Civil do Centro Universitário Filadélfia – Unifil, situado na cidade de Londrina.

Figura 7 – Agregados: (a) pedrisco; (b) pó de pedra; (c) areia media-grossa; (d) areia fina; (e) ADF



Fonte: Autoria Própria (2017).

4.2.1 Determinação da massa unitária

A determinação da massa unitária segue as recomendações da ABNT NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006). O ensaio seguiu o método C descrito nesta norma, uma vez que os agregados estavam no estado solto.

Primeiramente as amostras foram secas em estufa por 24 horas em uma temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Em seguida, pesou-se o recipiente vazio de forma cilíndrica e fabricado com material não atacável pela umidade. Após o registro, preencheu-se o recipiente com o agregado até que o mesmo transbordasse. Por fim, nivelou-se a camada superficial de modo a pesar o recipiente mais seu conteúdo

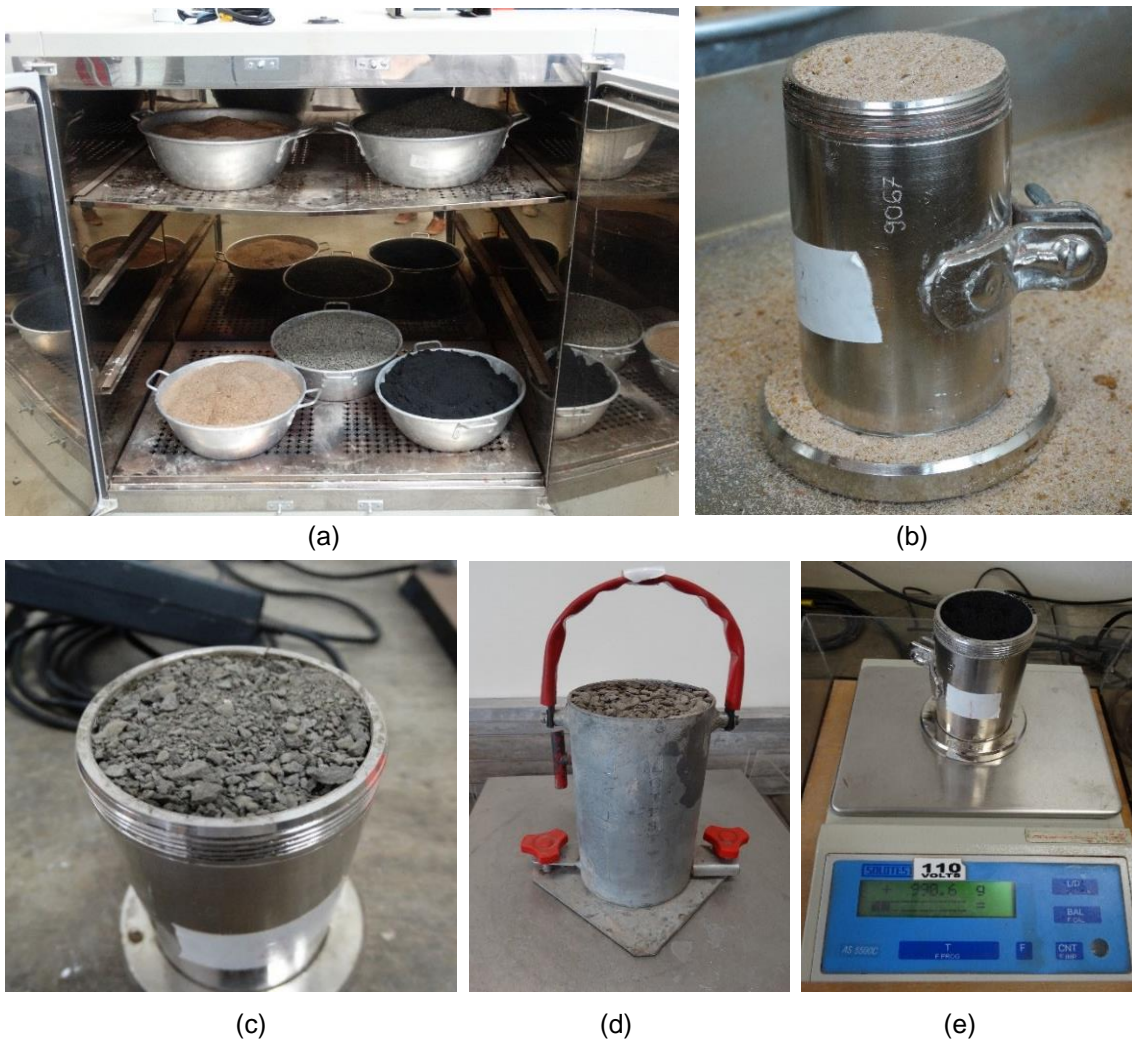
(Figura 8). No caso do pedrisco, utilizou-se recipiente com diâmetro maior que atendeu à norma (Quadro 2).

Quadro 2 – Características do recipiente conforme NM 45:2006.

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Recipiente		
	Capacidade mínima (dm ³)	Diâmetro interior (mm)	Altura interior (mm)
$d \leq 37,5$	10	220	268
$37,5 < d \leq 50$	15	260	282
$37,5 < d \leq 75$	30	360	294

Fonte: Adaptado de ABNT (2006).

Figura 8 – Fases do ensaio de determinação da massa unitária: (a) materiais em estufa; (b) recipiente específico para ensaio; (c) exemplo do nivelamento do material; (d) recipiente específico para agregados maiores; (e) pesagem final;



Fonte: Autoria própria (2017).

A massa unitária (ρ), determinada pelo Método C, foi calculada pela Equação 1.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (1)$$

Onde:

ρ_{ap} - massa unitária do agregado (Kg/m³);

m_{ar} - massa do recipiente mais o agregado (Kg);

m_r - massa do recipiente vazio (Kg);

V - volume do recipiente (m³).

4.2.2 Determinação da massa específica

A determinação da massa específica do agregado miúdo seguiu as recomendações da NBR 9775:2011. Inicialmente secou-se a amostra em estufa (110°C) e pesou-se 500 g do agregado. Em seguida, colocou-se água no frasco Chapman até a marca de 200 cm³ e logo após, inseriu-se, com auxílio de um funil, as 500 g de agregado no frasco. Foi preciso agitar o frasco cuidadosamente, com movimentos circulares, para eliminar as bolhas de ar. Por fim, registrou-se a leitura final do nível da água, que representa o volume de água deslocado pelo agregado (Figura 9).

Figura 9 – Metodologia frasco de Chapman: (a) Frasco de Chapman; (b) Frasco com água e agregado; (c) Leitura Final;



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autoria própria (2017).

A massa específica do agregado miúdo é calculada pela Equação 2.

$$\mu = \frac{500}{L - 200} \quad (2)$$

Onde,

μ - massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm³ ou kg/dm³;

L - leitura final do frasco (volume ocupado pela água+ agregado miúdo) -cm³.

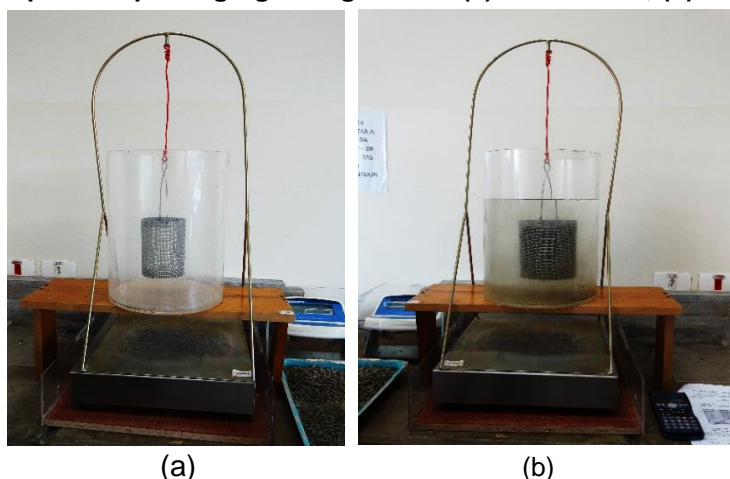
A determinação da massa específica do agregado graúdo, seguiu as especificações da norma NBR/ NM 53:2003, em que pesou-se a amostra conforme a dimensão máxima característica do agregado (Quadro 3). Para configurar o estado seco, foi pesado o conjunto recipiente/cesto/amostra. Posteriormente, imergiu-se a amostra em água, em temperatura ambiente, por meio de um cesto de arame de abertura de malha igual ou inferior a 3,35 mm e capacidade para 4 -7 dm³, por um período de 24 ± 4h em um recipiente. Após este período, pesou-se o conjunto recipiente/cesto/amostra imerso em água (Figura 10).

Quadro 3 – Massa mínima de amostra de ensaio

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa (kg)
12,5	2
19	3
25	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
112	50
125	75
150	125

Fonte: ABNT (2003)

Figura 10 - Massa específica para agregados graúdos: (a) cesto vazio; (b) cesto com agregado



Fonte: Autoria Própria (2017).

A Massa específica do agregado seco (d), foi determinada pela Equação 3.

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (3)$$

Onde:

m – massa da amostra (g/cm^3);

$m_s - m_a$ - recipiente/cesto/amostra (g/cm^3).

A diferença ($m_s - m_a$) é numericamente igual ao volume de agregado, excluindo-se os vazios permeáveis. Já a Massa específica do agregado saturado - superfície seca (d_s), pode ser obtido pela Equação 4.

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (4)$$

Onde:

m_s – massa da amostra saturada (g/cm^3);

m_a - recipiente/cesto/amostra saturados (g/cm^3).

4.2.3 Pulverulência

O ensaio de Pulverulência seguiu a norma NBR/NM 46:2003 (ABNT, 2003) – Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira 75 μm , por lavagem. Esta técnica é utilizada quando se deseja fazer determinações precisas de materiais mais finos, isto é, com 75 μm de diâmetro, como é o caso da ADF.

É preciso secar a amostra em estufa a 110°C, até a constância do peso. A massa inicial (M_i), foi de 100g para a ADF e 500g para o agregado Pó de Pedra. Em

seguida, a amostra de cada material foi vertida em uma peneira, e lavado com água corrente (Figura 11). A operação foi repetida até que a água de lavagem se tornasse limpa. Após este procedimento, o material retido em peneira foi seco em estufa, e pesado posteriormente (massa do material seco após a lavagem (M_f)).

O teor de materiais pulverulento é calculado pela Equação 5.

$$\% \text{ Mat Pulverulento} = \frac{M_i - M_f}{M_f} * 100 \quad (5)$$

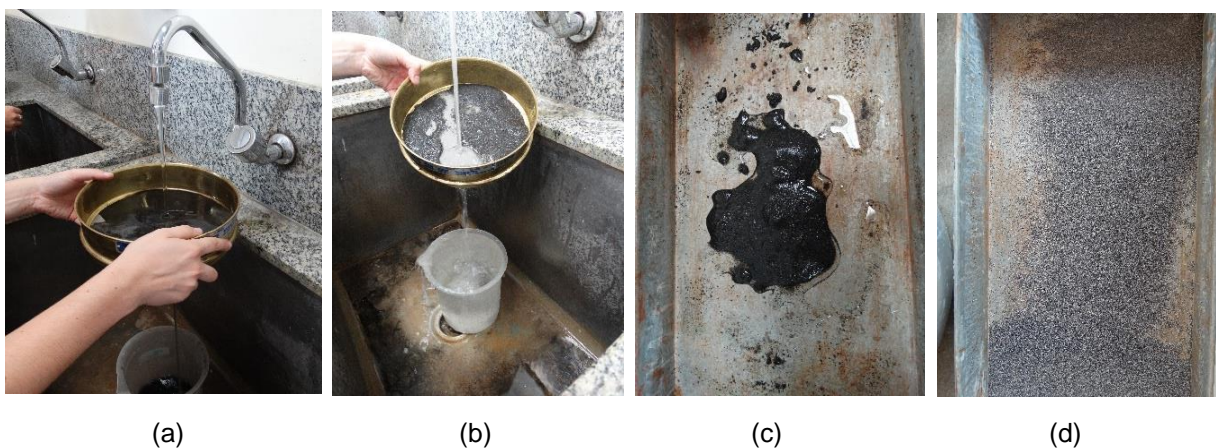
Onde:

M_t – material pulverulento (%);

M_i – massa inicial (g);

M_f – massa do material seco após a lavagem (g).

Figura 11 – Ensaio Pulverulento: (a) Lavagem do material; (b) Parada de lavagem – indicador Água de lavagem limpa; (c) material que sobrou em peneira; (d) material lavado e seco



Fonte: Autoria própria (2017).

4.2.4 Granulometria

Os ensaios de Granulometria seguiram a norma NBR NM 248:2003 – Agregados - Determinação da composição granulométrica, e as normas complementares: NBR – 5734: Peneiras para ensaio – Especificação e NBR – 7211: Agregados para concreto - Especificação.

O procedimento de ensaio descrito nesta norma é relativo à composição granulométrica do agregado miúdo e graúdo, ou seja, deve-se utilizar o conjunto de peneiras especificado no Quadro 4.

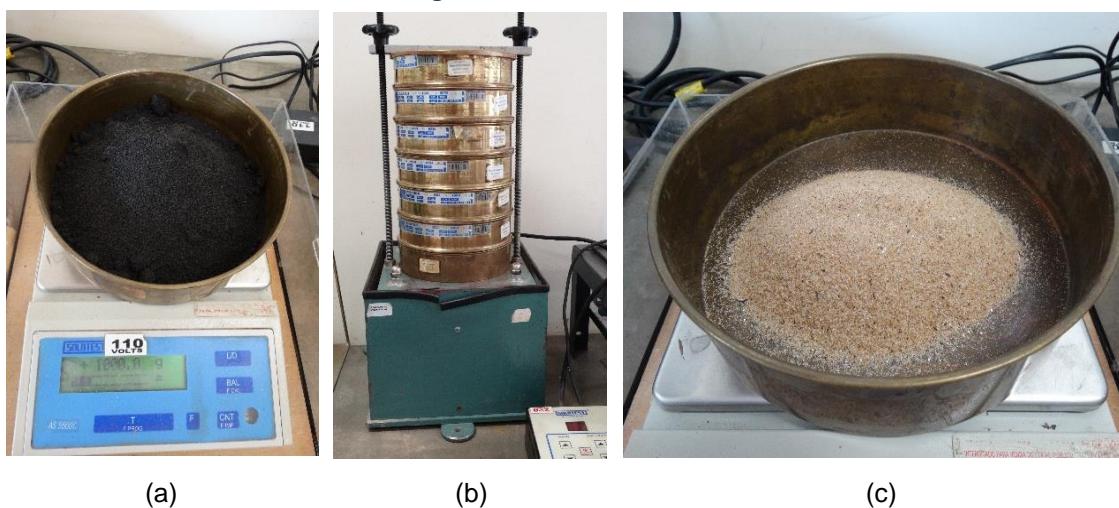
Quadro 4 – Peneiras: Série para Material Graúdo e Miúdo

Peneiras - Agregado Miúdo	Peneiras - Agregado Graúdo
X	38 mm
	25 mm
	19 mm
	9,5 mm
	6,3 mm
4,75 mm	4,75 mm
2,36 mm	2,36 mm
1,18 mm	1,18 mm
600 µm	600 µm
300 µm	300 µm
150 µm	150 µm
Fundo	Fundo

Fonte: Adaptado de ABNT (1989).

Primeiramente as amostras foram secas em estufa, e esperou-se esfriar. Pesou-se até atingir a constância da massa. Na sequência, as peneiras foram encaixadas de modo a formar um único conjunto, com abertura das malhas em ordem crescente, da base para o topo. A amostra foi acrescentada ao conjunto e agitada por 3 minutos em um agitador mecânico. Por fim, determinou-se a massa retida em cada peneira, incluindo o fundo (Figura 12). O somatório de todas as massas deve ser próximo ao valor total da amostra.

Figura 12 – Ensaio de Granulometria: (a) pesagem inicial; (b) conjunto de peneiras; (c) exemplo de material retido em uma das peneiras; (d) resultado visual de separação do agregado por granulometria diferente.





(d)

Fonte: Autoria própria (2017).

4.2.5 Ajuste do Traço

Para ajustar o traço, que relaciona as quantidades dos materiais constituintes de uma mistura, partiu-se do traço de referência.

Inseriu-se os dados da caracterização dos agregados em uma ferramenta computacional utilizada pela empresa, em que se estabelece limites favoráveis (superior e inferior) segundo o Prof. Idário Fernandes (FERNANDES, 2012), e uma curva ideal de distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo para aplicação em concreto, que atende aos limites estabelecidos pela NBR 7211:2009. Este procedimento serviu para determinar o traço com a inserção de areia de fundição, bem como a quantidade de cada agregado.

4.3 PRODUÇÃO DE PAVERS

A empresa BBL – Engenharia, atua no ramo da construção civil produzindo concreto usinado, blocos de concreto, *paver*, argamassa estabilizada e massa asfáltica para os mais diversos segmentos econômicos (industrial, comercial e residencial). É uma empresa que possui unidades industriais em diversas cidades no estado do Paraná. A unidade contribuinte está localizada na cidade de Sabáudia - PR, e foi responsável pela fabricação das peças.

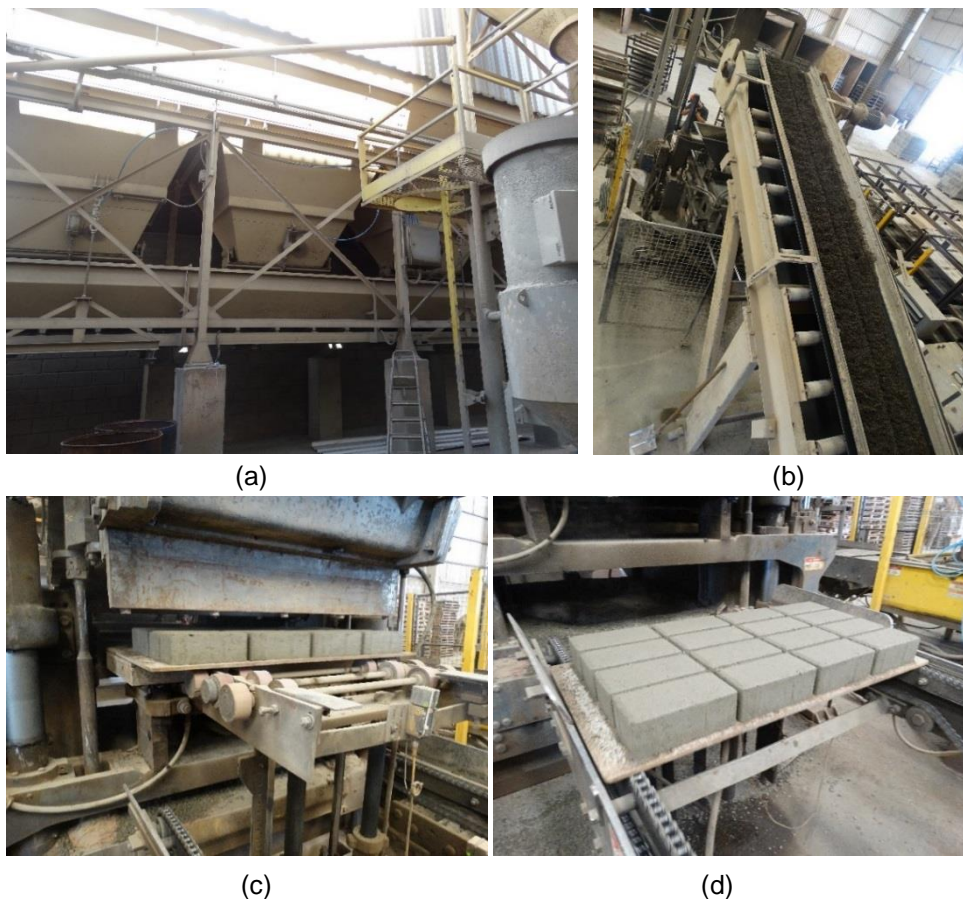
Foram produzidos *pavers* convencionais e *pavers* com o resíduo ADF, a fim de comparar o desempenho mecânico. Para a produção dos *pavers* de referência (traço da empresa contribuinte), foi utilizado cimento, CPV-ARI da marca Votoran, agregados (Pedrisco, pó de pedra, areia media-grossa e areia fina), aditivo (plastificante para concreto) CQ Press Mix Super e água. Na produção dos *pavers*

com a inserção da ADF, foram utilizados os mesmos insumos, exceto a areia fina, visto que a mesma foi totalmente substituída pela ADF.

Esta empresa possui três centrais (usinas) de concreto, sendo uma específica para a fabricação de *pavers*, com os seguintes equipamentos: misturador, correias transportadoras, máquina para moldar, empilhadeiras e caldeira utilizada para geração vapor das câmaras de cura térmica. A produção é totalmente automatizada.

A produção se deu por meio da inserção dos insumos em silos com balanças automáticas, que ao atingirem os pesos estipulados se fecham, de modo a evitar o desperdício de matéria prima. Após a inserção dos insumos, estes materiais foram para o misturador, onde adicionou-se o aditivo e a água. A mistura pronta, foi transportada pela esteira para serem moldadas e prensadas. Os *pavers* foram dispostos em bandejas (chapas) de ferro sendo paletizados e transportados, por empilhadeiras, até as câmaras de cura térmica (Figura 13).

Figura 13 – Produção e equipamentos: (a) Silos com balanças automáticas; (b) esteira transportadora; (c) moldagem e prensa das peças; (d) correias transportadoras com bandejas; (e) câmaras de cura térmica.



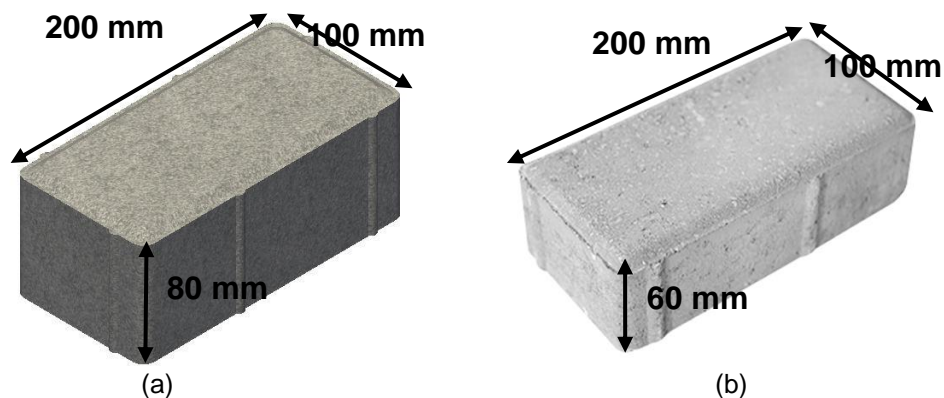


(e)

Fonte: Autoria própria (2017).

Os *pavers* foram fabricados em dois modelos, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Ilustração do *paver* e suas dimensões: (a) *paver* de 8cm; (b) *paver* de 6cm;



Fonte: Autoria Própria (2017).

4.3.1 Teor de umidade

Para determinar o teor de umidade na mistura da produção de *pavers*, realizou-se o método da frigideira (FONTE) na própria indústria.

Coletou-se aproximadamente 100g da mistura no estado úmido (m_h), e em seguida levou o material para o laboratório da fábrica. Colocou-se o material em uma frigideira no fogo e deixou-se até que toda a água evaporasse. Por fim, pesou-se a massa seca (m_s) e comparou-se os resultados obtidos, por meio da Equação 6, com a umidade medida automaticamente pela máquina de produção dos *pavers* (Figura 15).

Figura 15 – Teor de umidade: (a) coleta amostra; (b) secagem pelo método da frigideira.



Fonte: Autoria Própria (2017).

A determinação teor de umidade se deu pela Equação 6.

$$h = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100 \quad (6)$$

Em que:

m_h - massa úmida da amostra em g;

m_s - massa da amostra seca após a execução do ensaio em g.

4.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA

Os ensaios técnicos descritos a seguir, foram realizados com as amostras com e sem adição do resíduo (referência). Os ensaios de resistência à compressão simples e os demais exigidos pela norma, foram realizados aos 7 e 28 dias, pois os lotes das peças são entregues aos clientes com idade inferior a 28 dias estabelecidos pela NBR 9781:2013. Logo, estes devem apresentar no mínimo 80% da resistência característica à compressão, no momento de sua instalação, até que se alcance a resistência requerida com idade de cura de 28 ou superior a esta. De acordo com o item da NBR 6118/2014, a resistência à compressão aos 7 dias representa 81,87% da resistência final.

Aos 7 dias de cura, as peças foram ensaiadas no laboratório da própria fábrica e aos 28 dias, no Laboratório da Construção Civil do Senai - Maringá, acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO, a fim de validar os requisitos exigidos para comercialização deste novo produto.

A amostragem para os ensaios considerou o lote de fabricação. As peças foram escolhidas aleatoriamente, de modo a constituir uma amostragem representativa, conforme especificação da NBR 9781:2013 (Quadro 5).

Quadro 5 – Amostragem para ensaio

Ensaio Técnicos	Quantidade Amostrada
Inspeção visual	6 ^a
Avaliação dimensional	6 ^a
Absorção de água	3
Resistência à compressão	6
Resistência à abrasão	3 ^b

^a As peças amostradas podem ser utilizadas também para os ensaios de resistência à compressão ou abrasão. ^b Ensaio facultativo.
Fonte: ABNT (2013).

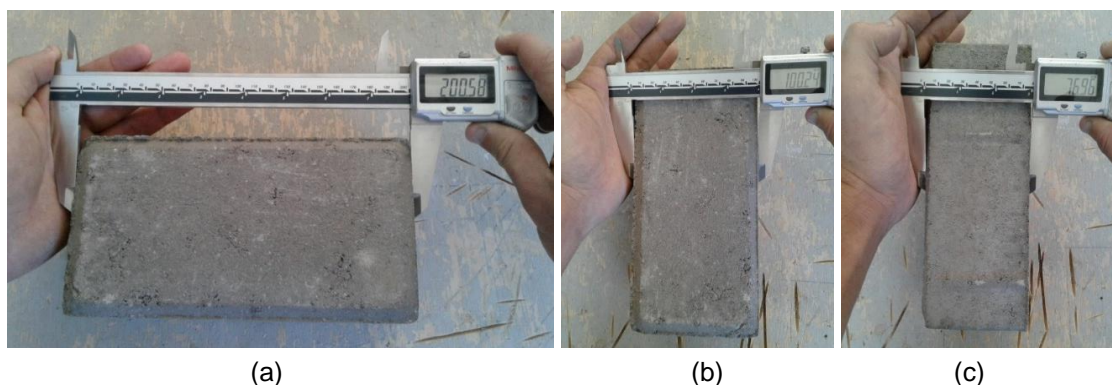
4.4.1 Inspeção visual

A inspeção visual ocorreu nas peças constituintes do lote para identificar possíveis defeitos que podem prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural e a estética. Observou-se também as arestas e rebarbas.

4.4.2 Avaliação Dimensional

A Avaliação Dimensional das peças com formatos tipo I, seguiu os requisitos conforme a ABNT NBR 9781/2013 - Anexo D. Utilizou-se paquímetro para obter as dimensões (comprimento, altura e largura) das peças amostradas (Figura 16) e em seguida comparou-se os resultados com as tolerâncias dimensionais estabelecidas pela norma (Quadro 6).

Figura 16 – Avaliação Dimensional: (a) comprimento; (b) largura; (c) espessura ou altura;



Fonte: Autoria Própria (2017).

Quadro 6 – Tolerâncias dimensionais das peças de concreto (mm).

Comprimento	Largura	Espessura
± 3	± 3	± 3

Fonte: ABNT (2013).

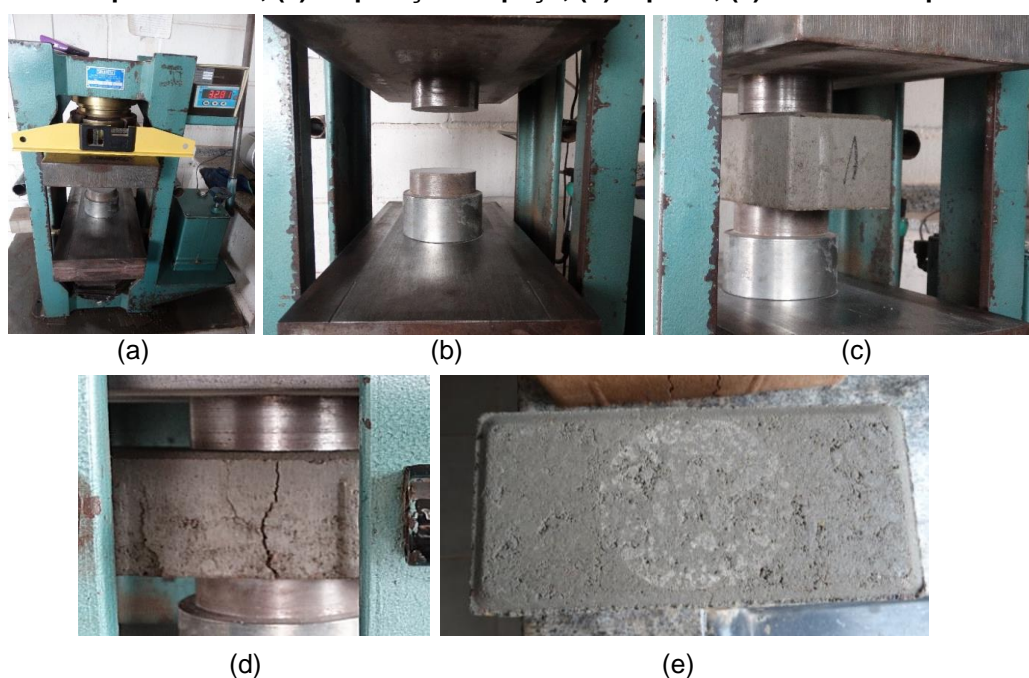
4.4.3 Ensaio de Resistência Característica à Compressão Simples

A determinação da resistência à compressão simples foi realizada em duas fases: a primeira, aos 7 dias, com equipamento considerado pela norma como classe 2, ou seja, equipamento que proporciona uma força contínua e isenta de choques, porém seu acionamento é manual (Figura 17).

As peças representativas do lote amostrado foram saturadas a $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por no mínimo 24 h antes do ensaio, e em seguida, foram retificadas, e capeadas com pasta de cimento, de modo a proporcionar uma superfície lisa e com distribuição uniforme do carregamento.

As peças foram dispostas sobre placas auxiliares de ensaio (circulares com diâmetro de $(85 \pm 0,5)$ mm e espessura mínima de 20 mm), com suas faces centralizadas com o eixo do disco. Por fim, a peça foi carregada, continuamente, com velocidade de 550 kPa/s e variação de mais ou menos 200 kPa/s até a ruptura (Figura 17).

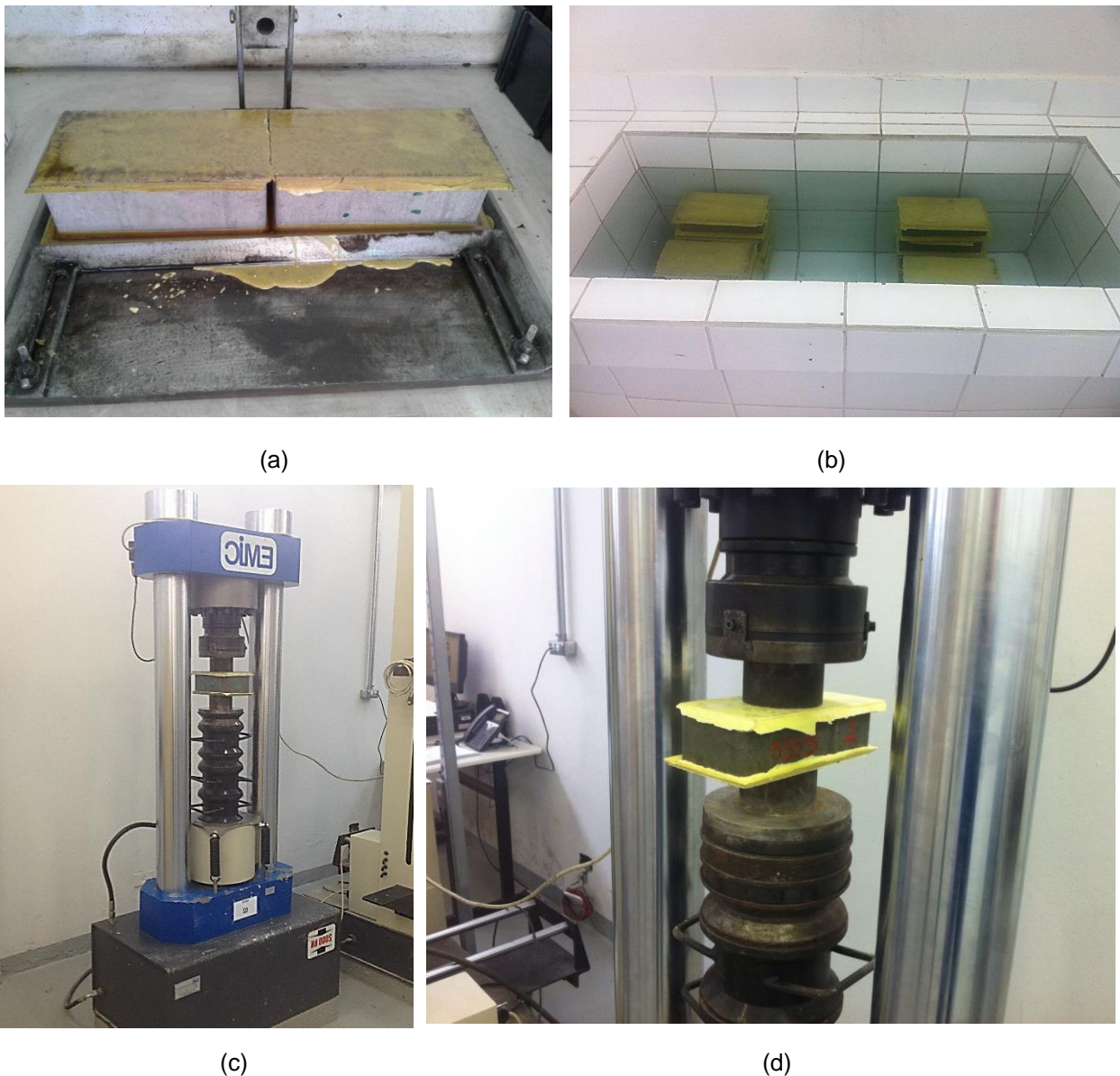
Figura 17 – Ensaio Mecânico a compressão 7 dias: (a) máquina simples de compressão; (b) discos para ensaio; (c) disposição da peça; (d) ruptura; (e) área de compressão.



Fonte: Autoria própria (2017).

O ensaio aos 28 dias foi realizado no Laboratório do Senai. Os procedimentos foram os mesmos adotados aos 7 dias, exceto o tipo de material para o capeamento, que foi realizado com enxofre. A máquina de ensaio pertence à classe 1, onde a força é aplicada de forma contínua e isenta de choques. O acionamento é automático até a ruptura. Este ensaio seguiu as especificações da ABNT NBR 9781/2013 - Anexo A (Figura 18).

Figura 18 – Ensaio Mecânico a compressão 28 dias: (a) capeamento; (b) saturação das peças; (c) maquina EMIC 2000 kN; (d) compactação;



Fonte: Autoria Própria (2017).

Os resultados da resistência a compressão, são expressos em MPa, e obtidos pela divisão da carga de ruptura (N), pela área de carregamento (mm²). O

resultado final é multiplicado pelo fator (p), determinado em função da altura da peça (Quadro 7).

Quadro 7 – Fator Multiplicativo p

Espessura nominal da peça (mm)	P
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: ABNT (2013).

O valor estimado da resistência à compressão pode ser calculado conforme a Equação 7.

$$F_{pk} = f_p - (t \times s) \quad \text{e} \quad s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \quad (7)$$

Sendo:

f_p - resistência média das peças, expressa em megapascal (MPa);

f_{pi} - resistência individual das peças, expressa em (MPa);

f_{pk} - resistência característica estimada à compressão, expressa em (MPa);

n - número de peças da amostra;

s - o desvio-padrão da amostra, expresso em (MPa);

t - coeficiente de Student, fornecido no quadro 8, em função do tamanho da amostra.

Quadro 8 – Coeficiente de Student - (Nível de confiança de 80%)

n	T
6	0,920
7	0,906
8	0,896
9	0,889
10	0,883
12	0,876
14	0,870
16	0,866
18	0,863
20	0,861
22	0,859
24	0,858
26	0,856
28	0,855
30	0,854
32	0,842

Fonte: ABNT (2013).

4.4.4 Ensaio de Determinação da Absorção de Água

A relação entre a massa do *paver* em estado seco com o saturado por meio da penetração de água em seus poros permeáveis, foi verificado por meio do ensaio de Determinação da Absorção de Água conforme a ABNT NBR 9781/2013 - Anexo B. Este ensaio consistiu basicamente em imergir os *pavers* em água à temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por 24h. Após este período, a amostra foi pesada na condição saturada. Posteriormente as amostras foram colocadas em estufa com temperatura a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e pesadas após 24 horas (Figura 19). O valor de absorção de água foi calculado utilizando a Equação 8.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (8)$$

Onde,

A - absorção de cada corpo de prova, expressa em porcentagem (%);

m1 - massa do corpo de prova seco, expressa em gramas (g);

m2 - massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

Figura 19 – Determinação da Absorção de água: (a) saturação das peças; (b) pesagem seca; (c) estufa de secagem;



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria (2017).

4.5 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Para verificar se a utilização da ADF é viável sob o ponto de vista econômico, tanto para as empresas geradoras do resíduo quanto por parte das empresas absorvedoras deles na forma de matéria prima, foi necessário realizar uma análise econômica.

Esta análise exigiu levantar as seguintes informações: a) quantidade de ADF; b) existência de custos de descarte; c) quantidade de areia utilizada na fabricação de cada unidade de *pavers*; d) custo da areia utilizada por unidade de *paver*; e) custos de utilização da ADF por tonelada; e) necessidade de investimento para utilização da ADF.

Nesta análise considerou os *pavers* com inserção da ADF de 6cm de altura, pois estes apresentam maior saída de mercado e são responsáveis por maior parte do faturamento da empresa parceira em relação a produção dos demais modelos. Além desses fatores, considerou-se a logística de ambas empresas, bem como os trâmites legais para que a empresa de fabricação dos *pavers* passe a ser receptora de resíduos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO ADF

Segundo o relatório de ensaio de caracterização e classificação da ADF, as características físicas do resíduo foram: resíduo no estado sólido, apresentando <0,100% de umidade, livre de líquidos livres, sendo todos os resultados do laudo expressos em base seca.

As análises realizadas na ADF na condição bruta, apresentaram os resultados mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Análises no Resíduo Bruto

Parâmetros Determinados	Valores Encontrados	Unidade
Cor da Amostra	Cinza	--
Cianeto	<1,00	mg kg ⁻¹
pH (solução 1:1)	8,82 ± 0,026	UpH
Sulfeto	<1,00	mg kg ⁻¹
Óleos e Graxas	0,28 ± 0,018	%
Fenol	<3,00	mg kg ⁻¹
Ponto de Fulgor	>60,0	°C

Fonte: Adaptado de Relatório de Ensaio – MULTIMET_NBR (2015).

A análise do Resíduo Bruto foi necessária, pois precisou-se conhecer as condições reais de alguns parâmetros da ADF, que servirão de base para os demais ensaios.

O extrato da lixiviação apresentou os valores apresentados na Tabela 6. Obteve-se também o pH de 5,12 ± 0,015 e o tempo total de lixiviação foi igual a 18h e um volume de 990 cm³.

Tabela 6 – Análises do Extrato Lixiviado

Parâmetros Determinados	Unidade	Especificação NBR 10004 - 2 ^a Ed. (31/05/2004) Anexo F	Valores Encontrados
Arsênio (As)	mg/L	1	<0,005
Bário (Ba)	mg/L	70	1,53 ± 0,024
Cádmio (Cd)	mg/L	0,5	<0,001
Chumbo (Pb)	mg/L	1	<0,005
Como Total (Cr)	mg/L	5	<0,025
Fluoreto (F ⁻)	mg/L	150	0949 ± 0,051
Mercúrio (Hg)	mg/L	0,1	<0,005
Prata (Ag)	mg/L	5	<0,005
Selênio (Se)	mg/L	1	<0,005

Pesticidas			
Aldrin _ Dieldrin	µg/L	3	<0,00025
Clordano	µg/L	20	<0,00025
DDT	µg/L	200	<0,00025
2,4-D	µg/L	3000	<0,100
Endrin	µg/L	60	<0,00025
Heptadoro e seu Epóxido	µg/L	3	<0,00025
Lindano	µg/L	200	<0,00025
Metoxicloro	µg/L	2000	<0,00025
Pentaclorofenol	µg/L	900	<0,100
Toxafeno	µg/L	500	<0,0005
2,4,5-T	µg/L	200	<0,100
2,4,5-TP	µg/L	1000	<0,100
Outros Orgânicos			
Benzeno	µg/L	500	<1,00
Benzo(a)pireno	µg/L	70	<0,010
Cloreto de vinila	µg/L	500	<0,500
Clorobenzeno	µg/L	100000	<1,00
Clorofórmio	µg/L	6000	<1,00
Cresol total (*)	µg/L	200000	<0,100
o-Cresol	µg/L	200000	<0,100
m-Cresol	µg/L	200000	<0,100
p-Cresol	µg/L	200000	<0,100
1,4-Diclorobenzeno	µg/L	7500	<1,00
1,2-Dicloroetano	µg/L	1000	<1,00
1,1-Dicloretileno	µg/L	3000	<1,00
2,4-Dinitrotolueno	µg/L	130	<0100
Hexaclorobenzeno	µg/L	100	<0,00025
Hexaclorobutadieno	µg/L	500	<1,00
Hexacloroetano	µg/L	3000	<0,00025
Metiletilcetona	µg/L	200000	<30,0
Nitrobenzeno	µg/L	2000	<0,100
Piridina	µg/L	5000	<30,0
Tetracloroeto de Carbono	µg/L	200	<1,00
Tetracloroetileno	µg/L	4000	<1,00
Tricloroetileno	µg/L	7000	<1,00
2,4,5-Triclorofenol	µg/L	400000	<0,100
2,4,6-Triclorofenol	µg/L	20000	<0,100

Fonte: Adaptado de Relatório de Ensaio – MULTIMET_NBR (2015).

Observa-se por meio da Tabela 6 que nenhum dos parâmetros para pesticidas ou outros orgânicos ultrapassaram os limites estipulados pela Norma NBR 10004:2004 – Anexo F. Assim, esse resíduo pode ser classificado como Resíduo não perigoso – Classe II. Esse material possui ausência de compostos orgânicos devido às altas temperaturas do processo produtivo.

As análises químicas do extrato solubilizado da ADF, que visa à diferenciação dos resíduos classificados nas classes de não inertes (classe IIA) ou inertes (classe IIB), apresentaram pH de $7,83 \pm 0,023$ e possuem teores de Alumínio, Ferro, e Fluoreto que ultrapassam os limites estipulados pela Norma NBR 10004:2004 (Tabela 7).

Tabela 7 – Análises do Extrato Solubilizado

Parâmetros Determinados	Unidade	Especificação NBR 10004 - 2ª Ed. (31/05/2004) ANEXO G	Valores Encontrados
Alumínio (Al)	mg/L	0,2	$0,623 \pm 0,011$
Arsênio (As)	mg/L	0,01	<0,005
Bário (Ba)	mg/L	0,7	$0,060 \pm 0,00096$
Cádmio (Cd)	mg/L	0,005	<0,001
Chumbo (Pb)	mg/L	0,01	<0,005
Cianeto (CN)	mg/L	0,07	<0,050
Cloretos (Cl)	mg/L	250	$5,74 \pm 0,14$
Cobre (Cu)	mg/L	2	<0,005
Cromo Total (Cr)	mg/L	0,05	<0,025
Ferro (Fe)	mg/L	0,3	$1,41 \pm 0,016$
Fluoreto (F ⁻)	mg/L	1,5	$2,01 \pm 0,11$
Manganês (Mn)	mg/L	0,1	$0,082 \pm 0,00071$
Mercúrio (Hg)	mg/L	0,001	<0,0001
Nitratos (expresso em N)	mg/L	10	<1,00
Prata (Ag)	mg/L	0,05	<0,005
Selênio (Se)	mg/L	0,01	<0,005
Sódio (Na)	mg/L	200	$3,03 \pm 0,047$
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	mg/L	250.0	$23,9 \pm 0,55$
Surfactantes	mg/L	0,5	<0,100
Zinco (Zn)	mg/L	5	<0,025
Fenóis Totais	mg/L	0,01	<0,010
Pesticidas			
Aldrin e dieldrin	µg/L	0,03	<0,00025
Clordano	µg/L	0,2	<0,00025
2,4-D	µg/L	30	<0,100
DDT	µg/L	2	<0,00025
Endrin	µg/L	0,6	<0,00025
Lindano	µg/L	2	<0,00025
Metoxicloro	µg/L	20	<0,00025
Toxafeno	µg/L	5	<0,00025
Heptacloro e seu epóxido	µg/L	0,03	<0,00025
Hexaclorobenzeno	µg/L	1	<0,00025
2,4,5-T	µg/L	2	<0,100
2,4,5-TP	µg/L	30	<0,100

Fonte: Adaptado de Relatório de Ensaio – MULTIMET_NBR (2015).

Acredita-se que os limites foram ultrapassados, pois perde-se no processo de fundição cerca de 35% do ferro ou alumínio líquido, porém destes 35%, 30% é aproveitado e retorna ao processo, mas 5% é perdido devido à aderência aos moldes. Estas perdas fazem parte do rendimento metalúrgico das empresas do ramo de fundidos. Assim, já que o resíduo possuiu constituintes que foram solubilizados em concentrações superiores aos das tabelas do Anexo G da norma, este foi classificado como não inerte.

Com base na Norma ABNT – NBR 10004 e conforme as características físico-químicas e químicas apresentadas, a amostra do resíduo ADF é classificada como CLASSE II A – Não Inerte. Ou seja, a ADF deve ser considerada como um resíduo não perigoso e não inerte, com propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, conforme o exposto no Anexo H. (NBR 10004:2004).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E AJUSTE DE TRAÇOS

O ensaio de massa unitária foi realizado em triplicata com cada agregado amostrado. Na Tabela 8 são apresentados os resultados médios obtidos.

Agregados	Massa Unitária (Kg/m³)
Pedrisco	1,349
Pó de Pedra	1,451
Areia Média-Grossa	1,535
Areia Fina	1,448
ADF	1,116

Fonte: Autoria Própria (2017).

Os resultados da Tabela 8 foram necessários para a determinação do traço em massa e em volume. Ressalta-se que com a massa unitária consegue-se ter controle de recebimento e estocagem dos agregados na fábrica.

A determinação da massa específica pelo método do frasco de Chapman, foi realizada em duplicata. A ADF, por ser muito fina, dificultou a passagem da água pelo frasco, sendo necessário adicionar 30 ml de água de modo a facilitar a leitura.

Os resultados de massa específica para os agregados graúdos e miúdos encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Massa Específica Agregado Graúdo e Agregados Miúdos

Agregados	Massa Específica (g/cm³)
Pedrisco	2,829
Pó de Pedra	2,849
Areia Média-Grossa	2,646
Areia Fina	2,688
ADF	2,404

Fonte: Autoria Própria (2017).

O ensaio de pulverulência foi realizado para os agregados pó de pedra e ADF, tendo em vista a quantidade elevada de pó, que afeta diretamente a resistência mecânica e a trabalhabilidade do concreto. Os resultados estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Pulverulência

Agregados	Material Pulverulento (%)
Pó de Pedra	14,59
ADF	16,55

Fonte: Autoria Própria (2017).

A norma NBR 7211:2009 estabelece os seguintes teores pulverulentos para agregados miúdos: 3,0% para concreto sujeito ao desgaste superficial, e 5,0% para outros concretos. Considerando que a ADF se enquadra como agregado miúdo, nota-se um elevado teor de pulverulência, o que aumenta a quantidade de água necessária para melhorar a consistência do concreto.

A ADF apresenta em sua composição bentonita, material fino obtido de certas argilas, que propiciam alterações no volume, intensificando desta forma a retração e reduzindo a resistência mecânica do material (BASILIO, 1995). Porém, Fernandes (2012) defende que até certo limite, o material pulverulento não prejudica a qualidade do concreto, por promover melhor arranjo da mistura, diminuindo os vazios e aumentando a resistência.

Quanto ao teor pulverulento para agregados resultantes da britagem de rocha, o pó de pedra está acima somente 2,6% do permitido pela norma, por isso, acredita-se que este valor não prejudicará o desempenho mecânico dos *pavers*.

Os ensaios de granulometria foram realizados em triplicata, respeitando-se os conjuntos de peneiras específicos para cada agregado amostrado. Após o ensaio, obteve-se a Dimensão Máxima Característica, além do módulo de finura, como mostram as Tabelas 11,12, 13, 14 e 15.

O pedrisco encontra-se na faixa granulométrica de 9,5 a 2,36mm, com maior retenção em 4,75mm (Tabela 11). Nas demais peneiras de aberturas inferiores, observou-se grãos retidos, indicando quantidade excessiva de areia.

Tabela 11 – Composição Granulométrica do Pedrisco.

Pedrisco			
Peneiras	Retido (g)	%Retida	%Ret-Acumulada
19mm	0,00	0	0
9,5mm	14,45	1,444	1,444
6,3mm	241,50	24,147	25,592
4,75mm	363,40	36,336	61,929
2,36mm	323,80	32,377	94,306
1,18mm	28,80	2,879	97,186
600µm	4,90	0,489	97,676
300µm	1,70	0,169	97,846
150µm	2,40	0,239	98,086
Fundo	19,14	1,913	
TOTAL	1000,09	100	100
Módulo de finura		5,47	
Dimensão máxima		4,75	

Fonte: Autoria Própria (2017).

Com os resultados da análise granulométrica e do módulo de finura (Tabela 12), o Pó de Pedra foi classificado como agregado “grosso”.

Tabela 12 - Composição Granulométrica do Pó De Pedra

Pó de pedra			
Peneiras	Retido (g)	%Retida	%Ret-Acumulada
4,75mm	9,80	0,982	0,982
2,36mm	359,00	35,975	36,957
1,18mm	329,40	33,009	69,966
600µm	110,70	11,093	81,060
300µm	50,50	5,060	86,120
150µm	42,70	4,278	90,399
Fundo	95,80	9,600	
TOTAL	997,90	100	100
Módulo de finura		3,654	
Dimensão máxima		4,75	

Fonte: Autoria Própria (2017).

De acordo com os resultados (Tabela 13) a Areia Média-Grossa se enquadrrou como “muito fina”, contrariando a classificação inicial.

Tabela 13 – Composição granulométrica da Areia Meia-Grossa

Areia Média Grossa			
Peneiras	Retido (g)	%Retida	%Ret-Acumulada
4,75mm	5,80	0,580	0,580
2,36mm	19,90	1,992	2,573
1,18mm	80,70	8,080	10,653
600µm	186,40	18,664	29,318
300µm	375,30	37,578	66,896
150µm	301,40	30,179	97,076
Fundo	29,20	2,923	
TOTAL	998,70	100	100
Módulo de finura		2,070	
Dimensão máxima		2,36 mm	

Fonte: Autoria Própria (2017)

A Areia fina apresentou faixa de granulometria entre 300 a 150 µm, bem como possui módulo de finura de 1,4%. Assim, este agregado foi classificado como “muito fino”, conforme mostram os dados da Tabela 14.

Tabela 14 - Composição granulométrica da Areia Fina

Areia fina			
Peneiras	Retido (g)	%Retida	%Ret-Acumulada
4,75mm	1,50	0,150	0,150
2,36mm	2,60	0,260	0,410
1,18mm	14,20	1,421	1,832
600µm	46,10	4,616	6,449
300µm	281,10	28,149	34,598
150µm	619,90	62,076	96,675
Fundo	33,20	3,324	
TOTAL	998,60	100	100
Módulo de finura		1,401162	
Dimensão máxima		1,18 mm	

Fonte: Autoria Própria (2017).

Por fim, a composição granulométrica obtida para a ADF (Tabela 15) indica maior retenção nas peneiras 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm. E de acordo com o módulo de finura encontrado, pode ser classificada como “muito fina”.

Tabela 15 - Composição granulométrica da ADF

Areia de fundição			
Peneiras	Retido (g)	%Retida	%Ret-Acumulada
4,75mm	1,70	0,170	0,170
2,36mm	13,30	1,332	1,503
1,18mm	23,40	2,345	3,848
600µm	166,10	16,646	20,495
300µm	628,10	62,948	83,443
150µm	157,60	15,794	99,238
Fundo	7,60	0,761	
TOTAL	997,80	100	100
Módulo de finura		2,0870	
Dimensão máxima		1,18	

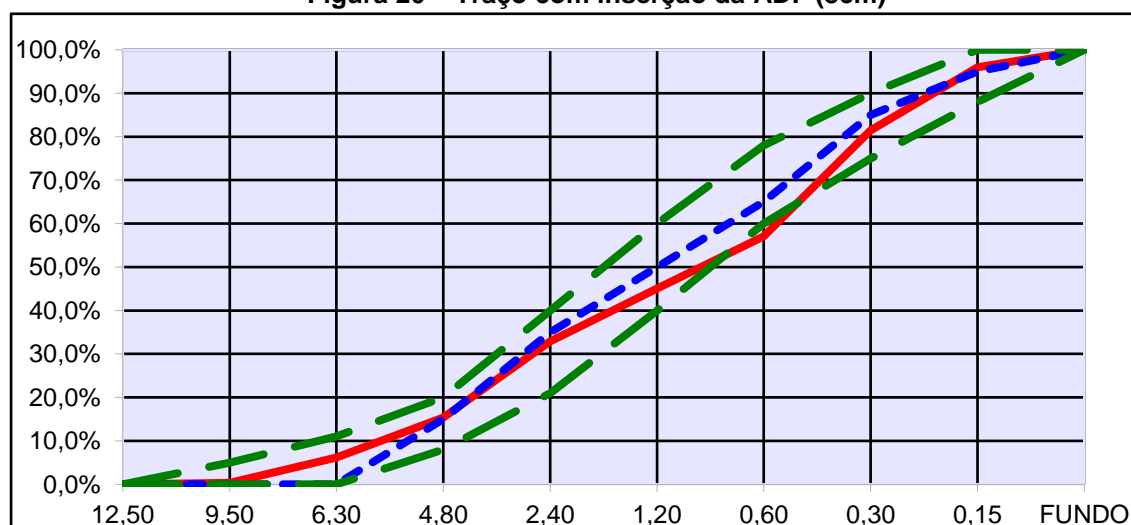
Fonte: Autoria Própria (2017).

5.2.1 Ajuste dos Traços

Com o auxílio de uma ferramenta computacional utilizada pela empresa, ajustou-se os traços com inserção da ADF, utilizando como parâmetro o traço de referência executado pela fábrica. Deste modo, inseriu-se os resultados da caracterização dos agregados e percebeu-se que a ADF apresentava características próximas a areia fina. Por isso, substituiu-se integralmente a areia fina natural pela ADF.

Para o traço do *paver* de 8cm de espessura (Figura 20) a porção substituída equivale a (15%) da ADF; e os demais agregados foram inseridos nas proporções de (36%) Areia Média-Grossa, (25%) Pó de Pedra e (24%) Pedrisco.

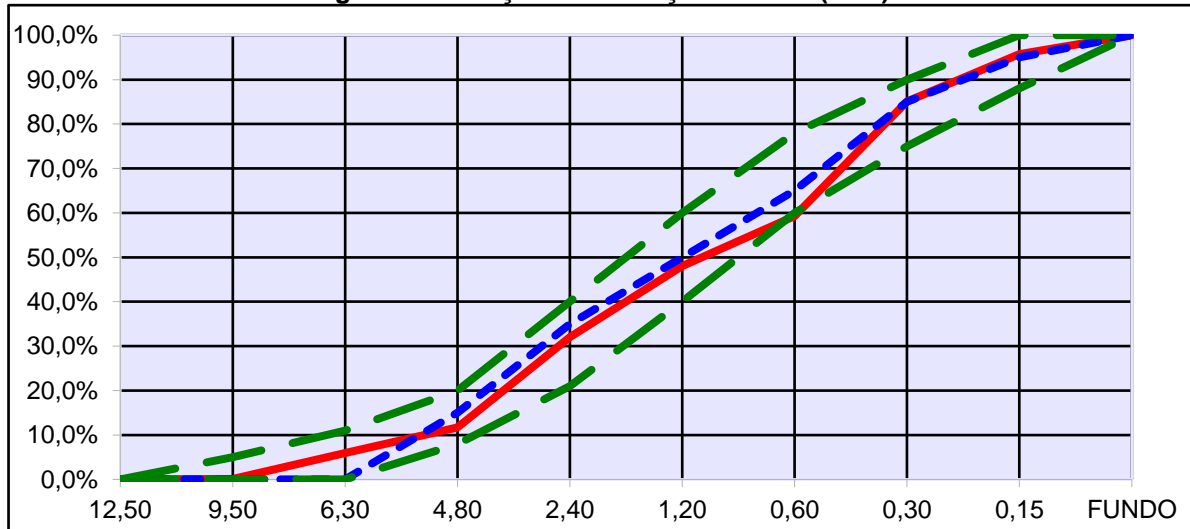
Figura 20 – Traço com inserção da ADF (8cm)



Fonte: Autoria Própria (2017).

O traço do *paver* de 6cm de espessura (Figura 21) foi ajustado com composição de: 15% de Pedrisco, 40% de Pó de Pedra, 25% da ADF e 20% de Areia Média-Grossa.

Figura 21 – Traço com inserção da ADF (6cm)



Fonte: BBL – Engenharia (2017).

5.2.2 Teor de Umidade

O teor de umidade da mistura na produção dos *pavers* foi medido pelo método da frigideira e comparado ao aferido automaticamente pela máquina (Tabela 16). Estes valores foram satisfatórios, pois segundo Fernandes (2012) a relação de umidade ideal para a produção de *pavers* é 7% e para a produção de *pavers* com ADF seguiu estes teores.

Tabela 16 – Resultado Teor de Umidade.

Teor de Umidade (%)	Paver 8cm		Paver 6cm	
	Ref.	ADF	Ref.	ADF
Máquina	6,0	7,0	7,0	7,0
Ensaio Frigideira	6,1	6,7	7,1	8,7

Fonte: Autoria Própria (2017).

5.3 ENSAIOS TÉCNICOS ABNT NBR 9781/2013

Os resultados dos ensaios recomendados para *pavers* encontram-se nos Quadros 9,10,11 e 12. Vale ressaltar que os ensaios de resistência à compressão aos 7 dias foram realizados em fábrica para controle, não sendo descritos a seguir.

Diferente dos ensaios aos 28 dias, que segundo a NBR 9781/2013 em seu Art. 6, exige que estes sejam feitos por laboratórios de terceira parte, acreditados pelo Inmetro. Logo, considerou-se os resultados obtidos pelo Laboratório do SENAI.

5.3.1 Resultados Paver (8cm)

Quadro 9 - Resultados Paver Referência (8cm) com Idade de 28 dias

1. DADOS DA AMOSTRA					
Identificação Peça/Lote: Paver Referência (Piso Línea 08cmx10cmx20cm) – Lote 1.					
Resistência do Projeto (F_{pk}): 35 MPa.					
Data de Fabricação: 31/03/2017.					
Data de Ensaio: 28/04/2017.					
2. DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL					
Ident. Amostra	Massa (g)	Índice de Forma (IF)	Dimensões (mm)		
			Comprimento	Largura	Espessura
R1	3607,6	2,6	199,8	99,3	77,9
R2	3497,7	2,6	199,9	99,7	75,8
R3	3634,3	2,6	201,5	99,8	78,0
R4	3593,4	2,6	200,2	99,6	76,8
R5	3561,3	2,7	200,3	100,3	75,4
R6	3538,6	2,6	200,7	99,9	76,0
Item 5.2 – Variações máximas (mm)		$IF \leq 4$	Comprimento ± 3	Largura ± 3	Espessura ± 3
Item 6.2 - Inspeção Visual		Arestas		Planeza da base	Aspecto Superficial
		Aprovado		Aprovado	Aprovado
3. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)					
Ident. Amostra	Carga de Ruptura (N)	Individual (Fpi)	Média (Fp)	Desvio Padrão (s)	F_{pk}
R1	223.616,280	39,4	37,7	2	35,9
R2	204.553,630	36,0			
R3	231.276,170	40,8			
R4	207.687,220	36,60			
R5	210.559,670	37,1			
R6	205.685,200	36,2			
Espessura Nominal da peça (mm)	Fator Multiplicativo "p"	Coefficiente de Student "t"	F_{pk} - resist. caract. à comp. F_{pi} - resist. individual t = coeficiente de Student	F_p = resist. média peças s - desvio padrão n - número de peças	
80	1,00	0,920	$F_{pk} = f_p - (t \times s)$	$s = \sqrt{\frac{\sum (fp-fpi)^2}{n-1}}$	
4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA					
Ident. Amostra	Massa		Fórmula	Absorção de água Individual (%)	Absorção de água média (%)
	M1 (g)	M2 (g)			
R7	3444,90	3597,10	$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$	4,4	4,0
R8	3490,60	3621,50		3,8	
R9	3531,70	3669,50		3,9	

Fonte: Autoria Própria (2017).

Quadro 10 - Resultados Paver ADF (8cm) com Idade de 28 dias

1. DADOS DA AMOSTRA						
Identificação Peça/Lote: Paver ADF (Piso Línea 08cmx10cmx20cm) – Lote 1.						
Resistência do Projeto (F_{pk}): 35 MPa.						
Data de Fabricação: 31/03/2017.						
Data de Ensaio: 28/04/2017.						
2. DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL						
Ident. Amostra	Massa (g)	Índice de Forma (IF)	Dimensões (mm)			
			Comprimento	Largura	Espessura	
F1	3554,3	2,6	200,3	99,9	76,7	
F2	3551,8	2,6	201,3	100,1	77,0	
F3	3565,7	2,5	199,2	100,8	78,7	
F4	3487,1	2,6	201,6	100,4	77,2	
F5	3554,1	2,5	198,9	99,8	80,6	
F6	3621,4	2,5	200,3	100,1	79,6	
Item 5.2 – Variações máximas (mm)		IF ≤ 4	Comprimento ± 3	Largura ± 3	Espessura ± 3	
Item 6.2 - Inspeção Visual		Arestas		Planeza da base	Aspecto Superficial	
		Aprovado		Aprovado	Aprovado	
3. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)						
Ident. Amostra	Carga de Ruptura (N)	Individual (F _{pi})	Média (F _p)	Desvio Padrão (s)	F _{pk}	
F1	177.308,830	31,2	30,1	2	28,4	
F2	172.086,190	30,3				
F3	177.134,730	31,2				
F4	164.861,520	29,1				
F5	152.240,130	26,8				
F6	181.922,170	32,1				
Espessura nominal da peça (mm)	Fator Multiplicativo "p"	Coefficiente de Student "t"	F _{pk} - resist. caract. à comp. F _{pi} - resist. individual t = coeficiente de Student	F _p = resist. média peças s = desvio padrão n - número de peças		
80	1,00	0,920	$F_{pk} = f_p - (t \times s)$	$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}}$		
4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA						
Ident. Amostra	Massa		Fórmula	Absorção de água Individual (%)	Absorção de água média (%)	
	M1 (g)	M2 (g)				
F7	3398,80	3597,60	$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$	5,8	5,6	
F8	3510,30	3700,90		5,4		
F9	3372,70	3561,30		5,6		

Fonte: Autoria Própria (2017).

Os pavers de referência (8 cm) não atenderam à análise dimensional relativa à espessura, enquanto que os com adição de ADF não atenderam em relação à resistência aos 28 dias, previstas em norma. Notou-se também, diferença nos resultados de absorção, com 5,6% para os pavers com adição de ADF e 4% para os de referência. Isto mostra, que o teor de finos contidos na ADF contribuiu para o aumento da absorção.

5.3.2 Resultados Paver (6cm)

Quadro 11 - Resultados Paver Referência (6cm) com Idade de 28 dias

1. DADOS DA AMOSTRA					
Identificação Peça/Lote: Paver Referência (Piso Línea 06cmx10cmx20cm) – Lote 2.					
Resistência do Projeto (F_{pk}): 35 MPa.					
Data de Fabricação: 04/05/2017.					
Data de Ensaio: 01/06/2017.					
2. DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL					
Ident. Amostra	Massa (g)	Índice de Forma (IF)	Dimensões (mm)		
			Comprimento	Largura	Espessura
R1	2708,3	3,4	198,8	97,8	57,9
R2	2710,0	3,3	197,9	98,4	59,1
R3	2667,2	3,4	197,5	97,9	58,1
R4	2699,1	3,3	197,6	98,3	59,4
R5	2705,5	3,4	197,6	98,0	58,5
R6	2719,2	3,4	197,6	97,7	58,9
Item 5.2 – Variações máximas (mm)		IF ≤ 4	Comprimento ± 3	Largura ± 3	Espessura ± 3
Item 6.2 - Inspeção Visual		Arestas		Planeza da base	Aspecto Superficial
		Aprovado		Aprovado	Aprovado
3. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)					
Ident. Amostra	Carga de Ruptura (N)	Individual (Fpi)	Média (Fp)	Desvio Padrão (s)	F_{pk}
R1	326.676,50	54,7	53,3	2,672	48,3
R2	303.348,69	50,8			
R3	338.601,53	56,7			
R4	298.822,38	50,0			
R5	330.593,47	55,3			
R6	312.227,19	52,3			
Espessura nominal da peça (mm)	Fator Multiplicativo "p"	Coefficiente de Student "t"	Fpk - resist. caract. à comp. Fpi - resist. individual t = coeficiente de Student		Fp = resist. média peças s - desvio padrão n - número de peças
60	0,95	0,920	$F_{pk} = f_p - (t \times s)$		$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}}$
4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA					
Ident. Amostra	Massa		Fórmula	Absorção de água Individual (%)	Absorção de água média (%)
	M1 (g)	M2 (g)			
R7	2667,00	2783,50	$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$	4,4	4,5
R8	2674,60	2791,60		4,4	
R9	2562,40	2681,30		4,6	

Fonte: Autoria Própria (2017).

Quadro 12 - Resultados Paver ADF (6cm) com Idade de 28 dias

1. DADOS DA AMOSTRA					
Identificação Peça/Lote: Paver ADF (Piso Línea 06cmx10cmx20cm) – Lote 2.					
Resistência do Projeto (F_{pk}): 35 MPa.					
Data de Fabricação: 04/05/2017.					
Data de Ensaio: 01/06/2017.					
2. DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL					
Ident. Amostra	Massa (g)	Índice de Forma (IF)	Dimensões (mm)		
			Comprimento	Largura	Espessura
F1	2470,5	3,6	197,2	97,8	54,2
F2	2700,9	3,4	198,0	98,2	58,2
F3	2610,2	3,5	198,0	98,1	56,4
F4	2501,8	3,6	197,6	98,6	54,7
F5	2592,0	3,5	197,9	98,1	56,3
F6	2531,4	3,5	197,3	97,5	56,0
Item 5.2 – Variações máximas (mm)		IF ≤ 4	Comprimento ± 3	Largura ± 3	Espessura ± 3
Item 6.2 - Inspeção Visual		Arestas		Planeza da base	Aspecto Superficial
		Aprovado		Aprovado	Aprovado
3. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)					
Ident. Amostra	Carga de Ruptura (N)	Individual (F _{pi})	Média (F _p)	Desvio Padrão (s)	F _{pk}
F1	235.193,16	39,4	40,7	1,473	37,4
F2	248.597,94	41,6			
F3	246.944,11	41,3			
F4	248.946,13	41,7			
F5	229.622,33	38,4			
F6	251.122,220	42,0			
Espessura nominal da peça (mm)	Fator Multiplicativo "p"	Coefficiente de Student "t"	F _{pk} - resist. caract. à comp. F _{pi} - resist. individual t = coeficiente de Student	F _p = resist. média peças s - desvio padrão n - número de peças	
60	0,95	0,920	$F_{pk} = f_p - (t \times s)$	$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}}$	
4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA					
Ident. Amostra	Massa		Fórmula	Absorção de água Individual (%)	Absorção de água média (%)
	M1 (g)	M2 (g)			
F7	2503,80	2631,50	$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$	5,1	4,6
F8	2515,80	2627,70		4,4	
F9	2527,70	2637,70		4,4	

Fonte: Autoria Própria (2017).

Observou-se que tanto os *pavers* de referência quanto os com adição de ADF apresentam valores de resistência à compressão e absorção dentro dos limites estabelecidos em norma. Em relação à análise dimensional, o *paver* com adição da ADF não atendeu os limites de tolerância previstos para a espessura. Nota-se também que a diminuição na espessura dos *pavers* pouco influenciou na absorção de água, visto que, os valores tiveram uma diferença de 0,1%.

5.4 RESULTADO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DA ADF

A produção mensal de *pavers* foi computada em m² desconsiderando, portanto, a espessura da peça, que é de 6 cm. A produção mensal da empresa BBL - Engenharia é de 9.600 m². Para este volume de produção são necessários 576 m³ de compostos e como o traço da composição utiliza 25% de areia fina, a utilização deste insumo é de 144 m³ mensais.

O custo desta areia, quando adquirida diretamente do porto de extração, chega a R\$ 44,00 a tonelada. Essa areia possui umidade de 3%, o que significa que são necessários 1450 kg para cada m³. Desta forma o m³ de areia sai por R\$ 63,80.

Para atender o consumo de areia fina por parte da BBL - Engenharia são dispendidos R\$ 15.567,20 mensais.

A quantidade de areia de fundição descartada pela empresa MGL é na média de 35 toneladas ao mês e o custo do descarte deste material em aterro sanitário é de R\$ 10.000,00. Este valor considera o transporte até o local e os custos inerentes à utilização do aterro.

Considerando que a areia seca pesa 1.600 kg/m³, são gerados 21,8 m³ deste resíduo a um custo de descarte aproximado de R\$ 457,00 o m³.

Analisando a opção da BBL - Engenharia de substituir a areia fina proveniente do porto de areia pela areia de descarte produzida pela MGL, esta seria capaz de atender a aproximadamente 15% de sua demanda, o que significa que a substituição integral por areia de descarte exigiria ter parcerias com outras 6 empresas.

O passo seguinte foi identificar os custos de transporte da areia de descarte até a empresa BBL - Engenharia e, para tanto, foi necessário levantar as distâncias de cada empresa e os custos do km/m³.

Um levantamento preliminar retrata 11 empresas de fundição em um raio de 20 km da BBL - Engenharia. Calculando a média destas distâncias obtém-se 11,5 km. Considerando que um caminhão basculante médio carrega 5m³ de areia e o valor cobrado pelo km rodado é de R\$ 17,50 na média, e que o custo médio para realizar a carga no caminhão por pá carregadeira é de R\$ 125,00 (o preço é de R\$ 250,00 a hora e o período mínimo de contratação é de 30 minutos, tempo suficiente para fazer a carga de 5m³ de areia), cada carga de 5m³ de areia resultaria num custo de R\$ 326,25 ou R\$ 65,25 o m³.

A aquisição da ADF, considerando os valores levantados sairia R\$ 1,45 mais caro por m³, que o valor pago pela areia proveniente do porto de extração. No entanto, resultaria em uma economia de R\$ 65.608,00 para os produtores de resíduo. Para que todos os participantes se sentissem motivados a participar deste projeto de utilização da ADF na fabricação de *pavers*, esta economia seria rateada entre os *players*. As empresas geradoras de resíduo poderiam, por exemplo, economizar 50% do que gastam para o descarte em aterro sanitário, pagando à empresa BBL - Engenharia o valor de R\$ 228,50 pelo m³ retirado.

A empresa BBL - Engenharia, por sua vez, descontaria os R\$ 65,25 gastos com o transporte de cada m³ de areia do valor recebido das empresas de fundição de R\$ 228,50 por m³, o que significa um retorno de R\$ 163,25 por m³, totalizando R\$ 23.508,00 de receita.

Desta forma, afirma-se que a substituição do uso de areia extraída diretamente do porto pela areia gerada na forma de resíduo pelas indústrias de fundição, é viável economicamente na medida que reduz custos para quem precisa descartá-la e para quem a necessita como insumo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

A classificação Classe II A – Não Inerte referente à ADF foi de suma importância, pois garantiu a incorporação de um resíduo industrial na formulação de um novo produto. Sugere-se, em estudos futuros, que se determine a classificação do *paver* segundo a ABNT 10.004, de modo a verificar a sua periculosidade enquanto resíduo sólido.

A substituição da areia fina oriunda dos portos de extração pela ADF gerada nas indústrias de fundidos, apresentou resultados satisfatórios no caso da fabricação de *pavers* com espessura de 6cm, pois as análises indicaram que foram atendidos os padrões impostos pela NBR 9781:2013 no que diz respeito à resistência do material e à qualidade no acabamento das peças. Vale ressaltar que a caracterização dos agregados é imprescindível para ajustar o traço com a inserção do resíduo. Logo julga-se necessário o ajuste do traço e estudos para a produção de *pavers* com espessura de 8cm, tendo em vista que estes não atingiram a resistência requerida.

Outro fator positivo observado com a inserção da ADF está associado ao baixo valor de comercialização. Dessa forma, a empresa consegue continuar produzindo misturas com inserção de diversos agregados sem alterar a quantidade de cimento para *pavers* de 35 MPa. A relação custo/benefício foi considerada satisfatória em virtude do desempenho técnico das misturas realizadas.

Este trabalho se enquadra, em termos de sustentabilidade, já que o reuso da ADF é viável sob o ponto de vista econômico, por solucionar uma problemática ambiental ligada à escassez dos recursos naturais não renováveis e atender à necessidade humana.

Acrescenta-se que, a reutilização da ADF trará resultados positivos para o meio ambiente tanto a montante, pela diminuição da necessidade de extração de areia, atividade sabidamente impactante ao meio ambiente, e a jusante, diminuindo a necessidade de absorção desta areia na forma de resíduo pelos aterros responsáveis por sua assimilação.

Espera-se que os resultados deste trabalho incentivem o reuso dos resíduos da ADF na formulação de novos produtos seguindo as diretrizes propostas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), de promover destino alternativo, adequado e viável.

REFERÊNCIAS

ALVES B. **Estudo da viabilidade ambiental da reutilização das areias descartadas de fundição**. 2012, 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

AVRELLA, J. P.D et al. **Estudo da viabilidade na reutilização de areia de fundição na produção de blocos de concreto**. In: SALÃO DO CONHECIMENTO, 2015, p 6, Rio Grande do Sul.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). **Guia ABIFA de fundição**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://abifa.org.br/indices-setoriais/>>. Acesso em: 31 de julho, 2016.

_____ (ABIFA). **Desempenho do setor de fundição / Setembro 2016**. Disponível em: <<http://www.abifa.org.br/Imagens/file/IndicesMercado/Desempenho/2015/DESEMPE NHOJUNHO2015.pdf>>. Acesso em: 25 setembro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. **Metalurgia e Desenvolvimento: a Corrida dos Metais no Brasil**. Editora Associação Brasileira De Metais, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9780**: Peças de concreto para pavimentação - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação: especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

_____. **NBR 10006**: Solubilização de Resíduos Sólidos – Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. São Paulo: ABNT, abr. 2006.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. São Paulo: ABNT, nov. 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. São Paulo: ABNT, nov. 2009.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. São Paulo: ABNT, set. 2003.

_____. **NBR 9775/2011:** Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio de frasco de Chapman – Método de ensaio. São Paulo: ABNT, set. 2011.

BASILIO, E. S. **Agregados para concreto.** ET 41, ABCP 1995.

BITTENCOURT, S. F. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição.** 2012. 108 f. Dissertação de Mestrado em Tecnologia – Na área de Tecnologia e Inovação, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012.

BRASIL. Lei nº 12305, de 02 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.** Brasília: Diário Oficial da União, 03 ago. 2010. Capítulo II, p. 4. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 29 agosto. 2016.

BRONDINO, O. C.; SILVA, J. P.G.; BRONDINO, N. C. M. **O Problema do descarte da areia de fundição: ensino para o desenvolvimento sustentável.** In: Engenharia: Múltiplos saberes e atuações, 2014, p 1 -12, Juiz de Fora.

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

CHEGATTI, S. **Aplicação de Resíduos de Fundição em Massa Asfáltica, Cerâmica Vermelha e Fritas Cerâmicas.** 2004. 137p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Santa Catarina, 2004.

CONAMA. Nº313, de 29 de outubro de 2002. **Resolução CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002:** Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Publicada no DOU nº226, 22 nov. 2002. Seção 1, p. 85-91. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm>>. Acesso em: 13 mai.2016.

COSTA, E.B.C. **Agregados: Caderno de aulas práticas.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. 28p.

DOMINGUES, L. G. F. **Viabilidade Ambiental e Econômica da Utilização de Areia Descartada de Fundição (ADF) na Cobertura de Aterros Sanitários.** 2015. 85 f. Dissertação de Mestrado em Tecnologia – Na área de Tecnologia e Inovação, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2015.

FAGUNDES, A. B.; VAZ, C. R.; OLIVEIRA, I. L. **Caminhos para a sustentabilidade do setor de fundição no Brasil.** In: SIMPOI, 2009, p 1-14.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers: Produção e Controle de Qualidade**. 4^o Edição. São Paulo, 2012.

HALLACK, A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. 1998, 116f. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, São Paulo, Brasil, 1998.

HALLACK, A. 2001, Pavimento Intertravado: uma solução universal. **Revista Prisma**, dez. 2001, p 25-27.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. Estado do Paraná. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais do Estado do Paraná: Relatório Jan/2004-Mai/2009**. Curitiba: IAP, 2009. 72 p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Governo Federal. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais: Relatório de Pesquisa**. Brasília, 2012. 74 p.

KLINSKY, L. M. G; FABRI, G. T.P. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. **Transportes**, v. XVII, n. 2, p 38 - 46, 2009.

MADRID, G. G., 1992, “**Standards and Specifications For Concrete Paving Blocks in Latin- American Countries**”, Fourth International concrete Block Paving Conference, Vol. 2, p. 345-354, Auckland, February 1992.

MARCON, M. F. **Aproveitamento da Areia de Fundição como agregado miúdo fino em concretos**. 2013. 69 f. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MELO, T. F. S. **Diagnóstico Ambiental em Área de Exploração Mineral: O Porto de Areia Estrela, em Ponta Grossa - PR**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa - PR, 2010.

NOVAIS, M, T, O; RIBEIRO, H, R, C. 2013. **Areia de Fundição: uma questão ambiental**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC, p 1-6, 2013.

PARANÁ (Estado). Lei nº 12493, de 22 de janeiro de 1999. **Estabelece Princípios, Procedimentos, Normas e Critérios Referentes A Geração, Acondicionamento, Armazenamento, Coleta, Transporte, Tratamento e Destinação Final dos Resíduos Sólidos no Estado do Paraná, Visando Controle da Poluição, da Contaminação e A Minimização de Seus Impactos Ambientais e Adota Outras Providências**. 5430. ed. Curitiba, PR, 05 fev. 1999. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/L_EIS/LEI_ESTADUAL_12493_DE_01_1999.pdf>. Acesso em: 25 maio 2016.

PINHEIRO, P.T.; FRANCISCHETTO, G. P. P. A política nacional de resíduos sólidos como mecanismo de fortalecimento das associações de catadores de materiais recicláveis. **Derecho y Cambio Social**, Lima, v. 13, n. 43, p.1-24, 1 fev. 2016. Anual. Disponível em: <http://www.derechoycambiosocial.com/revista043/A_POLITICA_NACIONAL_DE_RESIDUOS_SOLIDOS.pdf>. Acesso em: 19 julho. 2016.

PIOVESAN, A. Z. et al. **Utilização da Areia de Fundição para a fabricação de blocos de concreto para pavimentação**. In: XII ENTAC, 2008, p 1-11, Fortaleza.

SIDDIQUE, R. KAUR, G.; RAJOR, A. Waste foundry sand and its leachate characteristics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1027-1036, out 2010.

TOCCHETTO, M. R. L. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais**. Curso de especialização em tratamento e disposição final de resíduos sólidos e líquidos. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.