

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**ESTUDO DA INFLUENCIA DA BENTONITA PRESENTE NAS  
AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO NA  
CONTAMINAÇÃO DO SOLO E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

**SCHIRLENE CHEGATTI**

**FLORIANÓPOLIS, SC  
DEZEMBRO/2012**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**ESTUDO DA INFLUENCIA DA BENTONITA PRESENTE NAS  
AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO NA  
CONTAMINAÇÃO DO SOLO E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

**SCHIRLENE CHEGATTI**

Tese submetida ao Programa de  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião  
Roberto Soares

**FLORIANÓPOLIS,SC  
DEZEMBRO/2012**

Chegatti, Schirlene

Estudo da Influência da Bentonita Presente nas Areias Descartadas de Fundação na Contaminação do Solo e Águas Subterrâneas [tese] / Schirlene Chegatti ; orientador, Sebastião Roberto Soares - Florianópolis, SC, 2012.

146 p. ; 21cm

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Areias Descartadas de Fundação. 3. Avaliação de Risco. 4. Ciclo de Vida. 5. Impacto Ambiental. I. Soares, Sebastião Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Schirlene Chegatti

**ESTUDO DA INFLUENCIA DA BENTONITA PRESENTE NAS  
AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO NA  
CONTAMINAÇÃO DO SOLO E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Ambiental”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental  
Florianópolis, 17 de Dezembro de 2012.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Flávio Rubens Lapolli  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

|  |   |
|--|---|
| <p>_____<br/>Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares<br/>Orientador<br/>Universidade Federal de Santa<br/>Catarina</p>                | <p>_____<br/>Prof. Dr. Fernando Soares Pinto<br/>Sant’Anna<br/>Universidade Federal de Santa<br/>Catarina</p>         |
| <p>_____<br/>Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Catia R. Silva de<br/>Carvalho<br/>Universidade Federal de Santa<br/>Catarina</p> | <p>_____<br/>Prof. Dr. Leonardo de Brito<br/>Andrade<br/>Universidade Federal de Santa<br/>Catarina</p>               |
| <p>_____<br/>Prof. Dr. Wilson Luis Guesser<br/>Universidade do Estado de Santa<br/>Catarina</p>                                  | <p>_____<br/>Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Raquel Luísa Pereira<br/>Carnin<br/>Universidade Federal do Paraná</p> |



*Pai, para onde Deus tenha te levado, todos os dias desta jornada  
estavas comigo, dedico esse trabalho a você.  
Para minha querida Duda, meu milagre.*



## AGRADECIMENTOS

Para quem pensa que trabalhar em uma tese é um trabalho isolado, bem, ao menos para mim não é... Quando eu fecho os olhos várias imagens de pessoas maravilhosas vêm na minha mente. Vem também na mente tantas situações: ótimas, boas, ruins e até mesmo péssimas... Não há como esquecer cada momento durante essa fase, que envolveram altos e baixos e, tudo isso, compõe essa tese...até mesmo porque a tese, do ponto de vista pessoal, não é apenas o resultado de uma hipótese, mas um conjunto de situações, emoções, vivências e práticas que me fizeram chegar até aqui.

Mas realmente, primeiro tenho que falar das pessoas, aquelas “maravilhosas” que citei anteriormente.

Tati (Tatiane Cristina da Silva), Cris (Cristiane Florido), Tatá – que lindo! (Taisa Sandoli Rossetto), Rapha (Raphael Schumacher Bail) e Mailyn (Mailyn Kafer Gonçalves) foram mais que colaboradores dessa pesquisa, foram amigos. São amigos!! E mais: se jogaram de cabeça e acreditaram nas mesmas coisas em que acredito! Precisa dizer mais? Vocês estarão sempre no meu coração... Obrigado em sonhar esse sonho comigo que hoje se tornou realidade.

E tem aqueles amigos, que talvez nem se liguem o quanto os considero, os companheiros de jornada em defesa do bom uso das ADF, Raquel, Paulo, Elisângela, Luciana, Juciele, Fernando, Marise, Scoz, Renata. Obrigado pelo sempre compartilhar o conhecimento e assim juntos termos a oportunidade de crescer, não só como profissionais, mas como seres humanos mais solidários e sensíveis a justa causa. Obrigados por todos aqueles que nestes anos de convivência por maior ou menor a passagem pelo nosso grupo de pesquisa deixaram sua contribuição.

É claro que não podem faltar nesta lista àqueles sábios que me ajudaram muito nos momentos de incerteza: os professores. Agradeço a todos eles, aqueles quem cursei disciplina, e aqueles que me ajudaram a desvendar os mistérios das ADF: Carlos José de A. J.; Edgar B., Marilena V. F., Fernando A.M.Marinho, M. Maccarini, W.L.Guesser e em especial ao Sebastião R. S. (por mais que convivemos em “mundos” diferentes –universidade/empresa - acredito que neste período aprendemos juntos a compreender melhor as distintas atividades que realizamos e executar um bom trabalho juntos).

Obrigada à UFSC pela excelência na capacitação de profissionais, no incentivo à pesquisa e a formação de mestres e doutores que impulsionam o desenvolvimento sustentável deste país.

Também tem o agradecimento aos laboratórios e todos os profissionais que trabalham neles e contribuíram com excelência e eficácia nesta pesquisa: Acquaplant, Bioagri, Geoforma, LDCMSenai, LAME/LACTEC (Rodrigo e Marcelo), SOCIESC, Laboratórios de MEV – UDESC/Joinville.

Para a minha família: minha mãe, tão forte, tão valente nesta sempre ao lado dos filhos, venceu a perda do meu pai, que venceu enquanto eu trabalhava nesta tese, que foi a pessoa que sempre me deu força para continuar a estudar. Uma pessoa tão simples que não conclui os estudos, mas que viu que poderia dar sua contribuição e deu o maior presente que qualquer filho pode querer: uma educação digna e correta. Obrigado também tia Tereza, Fabi, Junior, Alison e um beijo para meus sobrinhos queridos.

Obrigado a todos os meus amigos sempre ao meu lado: Giannini, Carlas, Xande, Debora, Rodger...todo mundo...

Edu: obrigado por você estar nesta jornada comigo, independente dos contratemplos, eu acredito que juntos podemos ser cada vez melhores e mais felizes. Obrigado por dar outro sentido a minha vida, com a vinda da nossa amada Maria Eduarda (essa também tem grande futuro, ainda mais por assistir todas as aulas de estatística ainda na barriga!!)

Tenho um agradecimento mais que especial, para aquela pessoa que sempre acreditou em mim, no meu trabalho, sempre me incentivou e motivou e que independente da relação empresa-funcionário sempre terei um carinho muito especial: Sr. Edmilson Holtz. Apesar desse tipo de declaração não ser muito comum: você será sempre uma referência para mim de honestidade, exemplo e dedicação. Obrigada a Schulz por acreditar neste projeto e incentivá-lo!

E ao fim chego ao meu reencontro com Deus nesta fase, que fez que eu percebesse que tudo pode dar certo se a fé estiver em primeiro lugar no coração! Obrigado Meu Deus...

## RESUMO

As indústrias de fundição consomem grandes quantidades de matérias-primas e geram proporcionalmente grande quantidade de resíduos. Os principais resíduos gerados no processo de produção são areias, pós de exaustão, refratários e escórias. Destes, a Areia Descartada de Fundição (ADF) compreende aproximadamente 85% da geração e são constituídas basicamente de uma mistura contendo areia, argila, carvão e material fino. Historicamente, fundições depositaram os seus resíduos diretamente no solo causando riscos ambientais. No entanto, estudos mostraram que, em comparando os lixiviados obtidos por ADF com lixiviados de solo natural, sem contaminação, resultados semelhantes são observados. Em alguns casos, apenas os parâmetros ferro e manganês presentes em ADF têm taxas mais elevadas. Neste contexto, esta tese tem como objetivo estudar a influência de bentonita (matéria-prima presente no resíduo) no risco de impacto ambiental das ADF como agente para a impermeabilização e o encapsulamento, quando estas são dispostas no solo. Este estudo avaliou os riscos de poluição de solo e água subterrânea a partir do ciclo de vida da ADF, a caracterização de propriedades que permitem estabelecer uma relação entre a contenção de contaminantes e a percolação da areia sobre a quantidade de bentonita na mistura de ADF e a permeabilidade do resíduo descartado. Os resultados confirmaram que a presença de bentonita nas ADF reduz a permeabilidade e a formação de percolado durante a sua utilização ou disposição o que auxilia a explicar o baixo risco demonstrado em estudos de caso de monitoramento de águas subterrâneas de áreas de disposição e de análises de ADF para reutilização. Assim, este estudo fornece um indicador para as indústrias de fundição para melhoria da análise e investigação ambiental e para o auxílio na tomada de decisão da melhor alternativa para seu armazenamento e/ou reaproveitamento.

**Palavras-chave:** Areias Descartadas de Fundição, Análise do Ciclo de vida, Bentonita, Impacto Ambiental, Avaliação de Risco.



## ABSTRACT

The foundry industries consume large quantities of raw materials and generate proportionately large amount of solid waste. The waste generated from the production process are sands, powders exhaust systems, refractories and slags. Of these, the spent foundry sand (SFS) comprises approximately 85% of generation and are constituted basically of a mixture containing sand, clay, coal and fine material. Historically foundries have deposited their waste directly on the ground with environmental risks. However, studies have shown that in comparing the leachates obtained for SFS with leachates of natural soil, without contamination, similar results are observed. In some cases only for iron and manganese parameters of SFS have higher rates. In this context, this thesis aims to study the influence of bentonite (raw material present in the waste) in the risk of environmental impact of SFS as agent for waterproofing and encapsulation when they are laid in the soil. This study analyzed the risks from the life cycle of SFS, properties characterization that allow establishing a relationship between the containment of contaminants and the percolation of the sand on the amount of bentonite in the mixture of sand casting and discarded permeability residue. The results confirmed that the presence of bentonite in the SFS reduces the permeability and the formation of leachate during its use or disposal which that helps to explain the low risk demonstrated in case studies of groundwater monitoring of disposal areas and SFS analysis for reuse. Thus this study provides an indicator to foundry industries for improving analysis and environmental research and to aid in decision making in the best alternative for storage or reuse.

**Keywords:** Spent foundry sand, bentonite, risk assessment, environmental impact.



## LISTA DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1 Etapas de geração dos resíduos de fundição. ....  | 24  |
| Figura 2 Unidade fundamental dos argilominerais .....  | 40  |
| Figura 3 Microscopia eletrônica de varredura da bentonita cálcica. ....  | 47  |
| Figura 4 Microscopia eletrônica de varredura da bentonita sódica. ....   | 47  |
| Figura 5. Aplicação de bentonita em misturas com solo.....   | 51  |
| Figura 6. Fluxograma de caracterização do ciclo de vida das ADF.....   | 70  |
| Figura 7 Curva de compactação de ADF com diferentes teores de bentonita.....   | 90  |
| Figura 8 Microscopia eletrônica de varredura de ADFs - destacado mapa do elemento alumínio. ....                             | 95  |
| Figura 9 Gráfico do teor de bentonita, em %, pelo coeficiente de condutividade hidráulica, em cm/s, das amostras de ADF..... | 109 |
| Figura 10 Teor de argila ativa das ADF.....  | 112 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 Métodos analíticos empregados na caracterização das amostras .....                     | 64 |
| Quadro 2 Valores de marcos de referência utilizados na avaliação do risco ecológico .....       | 68 |
| Quadro 3 Planejamento experimental – valores altos, intermediários e baixos das variáveis ..... | 82 |
| Quadro 4 Combinações viáveis tecnicamente para realização dos testes de moldagem.....           | 83 |
| Quadro 5 Sequência das amostras utilizadas na discussão dos resultados .....                    | 86 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 Solubilização de amostras de solos naturais (Joinville-SC) ...  | 27  |
| Tabela 2 Solubilização de ADF e suas matérias primas.....  | 27  |
| Tabela 3 Características especificadas pela CEMP para o pó de carvão para fundição.....                          | 38  |
| Tabela 4 Classificação das argilas segundo tipo e grupo de argilominerais.....                                   | 41  |
| Tabela 5 Capacidade de troca catiônica (CTC) de aluminossilicatos....  | 43  |
| Tabela 6 Métodos para determinação do coeficiente de permeabilidade.....   | 45  |
| Tabela 7 Composição química (% em óxidos) das bentonitas em estudo.....  | 46  |
| Tabela 8 Estudos relacionando bentonita e redução de impacto ambiental.....                                      | 50  |
| Tabela 9 Especificações de bentonita para fundição.....  | 53  |
| Tabela 10 Composição típica e propriedades da areia de moldagem....  | 53  |
| Tabela 11 Defeitos de fundição relacionados ao tipo de bentonita.....  | 54  |
| Tabela 12 Propriedades de ADFs.....  | 55  |
| Tabela 13 Composição de ADFs obtida por fluorescência de raios-X..   | 55  |
| Tabela 14 Determinação do risco carcinogênico considerando cenário residencial de exposição.....                 | 71  |
| Tabela 15 Determinação do risco não carcinogênico considerando cenário residencial de exposição.....             | 72  |
| Tabela 16 Determinação do risco ecológico do ciclo de vida da ADF utilizando marcos de referência do EPA.....    | 76  |
| Tabela 17 Determinação do risco ecológico do ciclo de vida da ADF utilizando marcos de referência do CONAMA..... | 77  |
| Tabela 18 Resultados da análise de granulometria.....  | 87  |
| Tabela 19 Limites de Atterberg para ADF.....   | 87  |
| Tabela 20 Compactação das amostras de ADF.....   | 89  |
| Tabela 21 Fluorescência de raios-X de ADF.....   | 92  |
| Tabela 22 Difração de raio-X de ADF.....   | 94  |
| Tabela 23 Valores médios da análise em triplicata de massa bruta de ADF.....                                     | 97  |
| Tabela 24 Valores médios da análise em triplicata do lixiviado de ADF.....                                       | 99  |
| Tabela 25 Índice de vazios das amostras.....   | 106 |
| Tabela 26 Resultados dos coeficientes de condutividade hidráulica...   | 107 |
| Tabela 27 Análise química do percolado.....  | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 28 CTC – Capacidade de Troca Catiônica de ADFs..... | 111 |
| Tabela 29 Teor de argila ativa das ADF .....               | 112 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADF – Areia Descartada de Fundição  
NBR – Norma Brasileira  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente  
ABIFA – Associação Brasileira de Fundição  
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
CONSEMA – Conselho Estadual de Meio Ambiente  
CEMP – Comissões de Estudos de Matérias Primas  
CTC – Capacidade de Troca Catiônica  
LP – Limite de Plasticidade  
LL – Limite de Liquidez  
IP – Índice de Plasticidade  
Cc – Índice de Compressão  
FRX – Fluorescência de Raios X  
DRX – Difração de Raios X  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
RCV – Resistência à Compressão a Verde  
RTU – Resistência à Tração a Úmido  
AFS – American Foundrymen Society  
EPA – Environmental Protection Agency  
USEPA – United States Environmental Protection Agency  
HQ – Quociente de perigo não carcinogênico  
SF – Fator de carcinogenicidade  
 $\rho_{dm\acute{a}x}$  – Massa específica seca máxima  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
k – Coeficiente de condutividade hidráulica (cm/s)  
 $k_w$  - Coeficiente de condutividade hidráulica corrigido (cm/s)  
TAA – Teor de Argila Ativa



## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL, QUESTÕES DA PESQUISA E ESTRUTURA.....</b>                  | <b>23</b> |
| 1.1 INTRODUÇÃO.....  | 23        |
| 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....  | 23        |
| 1.3 CONTEXTO LEGAL.....  | 28        |
| 1.4 QUESTÃO DA PESQUISA.....   | 30        |
| 1.4.1 <i>Hipótese</i> .....  | 30        |
| 1.4.2 <i>Delimitações</i> .....  | 31        |
| 1.4.3 <i>Objetivos</i> .....   | 31        |
| 1.5 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA TESE.....   | 32        |
| <b>CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>   | <b>34</b> |
| 2.1 CICLO DE VIDA DAS AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO.....                                  | 34        |
| 2.2 PANORAMA DO SETOR DE FUNDIÇÃO.....   | 34        |
| 2.3 PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....  | 35        |
| 2.4 MATÉRIAS-PRIMAS DAS AREIAS DE MOLDAGEM.....  | 37        |
| 2.4.1 <i>Areia para Fundição</i> .....   | 37        |
| 2.4.2 <i>Pó de Carvão</i> .....  | 38        |
| 2.4.3 <i>Ligantes</i> .....  | 38        |
| 2.5 A BENTONITA E A FUNDIÇÃO.....  | 39        |
| 2.5.1 <i>Argilas</i> .....   | 39        |
| 2.5.2 <i>Propriedades e Caracterização das Argilas</i> .....                               | 41        |
| 2.5.3 <i>Bentonita</i> .....   | 45        |
| 2.6 AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO.....  | 54        |
| 2.6.1 <i>Reaproveitamento das Areias Descartadas de Fundição</i> .....                     | 56        |
| 2.7 ANÁLISE DE RISCO.....  | 58        |
| <b>CAPÍTULO 3 AVALIAÇÃO DE RISCO DO CICLO DE VIDA DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO.....</b> | <b>62</b> |
| 3.1 RESUMO.....  | 62        |
| 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....   | 63        |
| 3.2.1 <i>Caracterização do Ciclo de Vida da ADF</i> .....                                  | 63        |
| 3.2.2 <i>Avaliação do Risco à Saúde Humana</i> .....                                       | 64        |
| 3.2.3 <i>Avaliação do Risco Ecológico</i> .....  | 67        |
| 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....  | 68        |
| 3.3.1 <i>Inventário de Caracterização do Ciclo de Vida da ADF</i> .....                    | 68        |
| 3.3.2 <i>Resultados da Avaliação do Risco à Saúde Humana</i> .....                         | 71        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.3.3 <i>Resultados da Avaliação do Risco Ecológico</i> .....  | 75         |
| 3.4 CONCLUSÃO.....   | 79         |
| <b>CAPÍTULO 4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES<br/>GEOTÉCNICAS E AMBIENTAIS DA BENTONITA COMO<br/>MATERIAL IMPERMEABILIZANTE EM AREIAS<br/>DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO.....</b> | <b>81</b>  |
| 4.1 RESUMO .....   | 81         |
| 4.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....  | 82         |
| 4.2.1 <i>Definição das Amostras</i> .....  | 82         |
| 4.2.2 <i>Caracterizações das Amostras</i> .....  | 83         |
| 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 85         |
| 4. 3.1 <i>Caracterização Física</i> .....  | 86         |
| 4. 3.2 <i>Caracterização Química</i> .....   | 91         |
| 4. 4 CONCLUSÃO .....   | 100        |
| <b>CAPÍTULO 5 AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE<br/>CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM FUNÇÃO DO TEOR DE<br/>BENTONITA EM AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO .</b>                          | <b>101</b> |
| 5.1 RESUMO .....   | 101        |
| 5.2 MATERIAL E MÉTODOS .....   | 101        |
| 5.2.1 <i>Ensaio De Condutividade Hidráulica (k)</i> .....  | 102        |
| 5.2.2 <i>Análise Química dos Percolados das Amostras de ADF</i> ....   | 103        |
| 5.2.3 <i>Análise da Capacidade de Troca de Cátions em ADF</i> .....  | 104        |
| 5.2.4 <i>Determinação do Teor de Argila Ativa</i> .....  | 105        |
| 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 105        |
| 5.3.1 <i>Coefficiente de Condutividade Hidráulica</i> .....  | 105        |
| 5.3.2 <i>Percolado</i> .....   | 110        |
| 5.3.3 <i>Capacidade de Troca De Cátions (CTC)</i> .....  | 111        |
| 5.3.4 <i>Teor de Argila Ativa</i> .....  | 112        |
| 5.4 CONCLUSÃO.....   | 112        |
| <b>CAPÍTULO 6 DISCUSSÃO GERAL E CONCLUSÃO .....</b>  | <b>114</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>118</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>   | <b>131</b> |

# **CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL, QUESTÕES DA PESQUISA E ESTRUTURA**

## **1.1 INTRODUÇÃO**

As indústrias de fundição participam significativamente do mercado globalizado, tendo em vista suas atividades, entre outras, nos ramos automotivo, agroindustrial, doméstico e bélico. Em contrapartida, para atender a demanda destas diversas atividades também é necessário consumir matérias primas, insumos e recursos energéticos. Nas indústrias de fundição de ferro as principais matérias primas são ferro gusa, sucata de aço e ligas metálicas complementares. E os principais insumos são inoculantes, areia, pó de carvão, argilas, água e energia elétrica, gás natural ou gás liquefeito de petróleo.

Como outros processos produtivos nem todas essas entradas são convertidas em produtos finais. Assim, são geradas emissões gasosas, líquidas e sólidas. Dentre estas últimas os resíduos de areia de fundição, ou areia verde como são chamadas comumente no processo de fundição, destacam-se pelo alto volume gerado durante o processo.

As areias descartadas de fundição, doravante denominadas ADF, representam um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. No Brasil são descartadas mais de dois milhões de toneladas por ano, concentradas em duas regiões do país: Sul e Sudeste. A maior parte destes resíduos é disposta em aterros industriais.

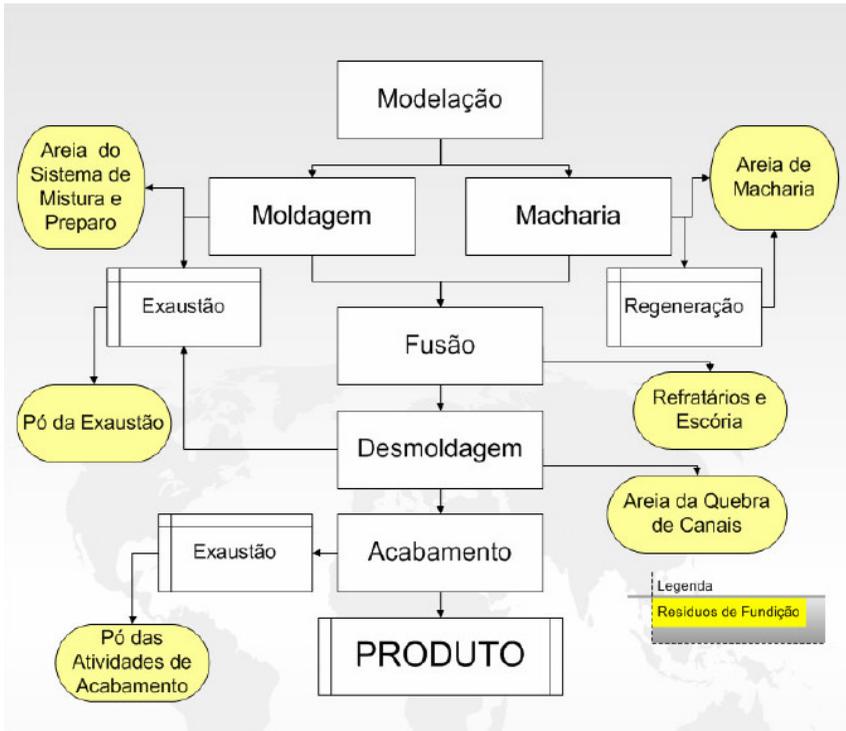
## **1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA**

O conhecimento dos resíduos industriais e de como fazer seu monitoramento é útil para a implantação de medidas corretivas de impacto. Este processo é destinado a reunir todos os elementos que concorrem em uma decisão para agir sobre o meio ambiente.

A produção de fundidos gera grande quantidade de resíduos que são principalmente aterrados e poucas vezes reutilizados (SKVÁRA et al., 2002). Dentre estes estão incluídos: areias da macharia e moldagem, pós e refratários da fusão, pós do acabamento, além de materiais auxiliares que trazem consigo papel, plástico, madeira, etc.

Oliveira (1998) destaca ainda outros resíduos provenientes do processo de fundição como: escória de fundição, sucata de ferro,

material particulado e vapores dos fornos que podem ser identificados dentro dos seus processos na Figura 1.



**Figura 1** Etapas de geração dos resíduos de fundição.

Fonte: (CHEGATTI, 2004)

Mesmo sendo recicladoras por consumir grande quantidade de sucata, as fundições possuem uma problemática ambiental tendo em conta o grande volume de subprodutos que ainda são enviados para aterros ou depositados erroneamente no solo sem controle.

Para Winkler e Bol'Shakov (2000) e Dungan et al. (2006), a maior parte do resíduo de moldagem, que compõe aproximadamente 85% do resíduo total gerado pelo processo de fundição, é constituído de areia, geralmente sílica, olivina, zircônio, cromita e outras areias básicas utilizadas. A sílica é composta do mineral de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) sendo que a adição de outros minerais ou resíduos altera sua sinterização. Desta forma, ADF contém outros componentes incluindo: argilas, pó de carvão, derivados do petróleo e outros produtos químicos orgânicos.

Biolo (2003), diz que dependendo do ligante empregado, uma areia de fundição pode ser classificada como resíduo não inerte ou perigoso, através dos padrões indicados pelas normas utilizadas para classificação de resíduos NBR 10.004, 10.005 e 10.006 (ABNT, 2004a) (ABNT, 2004b) e (ABNT, 2004c). Para Walden (2003) a ADF é considerada um resíduo sólido, mas não um resíduo perigoso, por não apresentar qualquer característica de toxicidade e não conter constituintes perigosos acima dos padrões da legislação correlata. Para determinar seus impactos no meio ambiente, a ADF tem sido extensivamente testada através de ensaios previstos nas normas de procedimentos para lixiviação. Sua composição e a determinação do seu lixiviado podem ser extremamente complexas, isto porque na investigação dos constituintes orgânicos se encontra o uso de ligantes nas matérias primas que vão compor o resíduo ou pela sua decomposição durante o processo de fundição quando se inicia sua geração (BASTIAN; ALLEMAN, 1998).

No entanto, resultados de laboratório indicam que uma ampla variedade de compostos orgânicos está presente nos lixiviados dos resíduos de fundição e que a maioria se apresenta em baixas concentrações inclusive dos limites de toxicidade permitidos. Quanto aos constituintes orgânicos, a ADF apresenta um baixo potencial de lixiviação, comparando-se com areias quimicamente ligadas ou machos (WINKLER; BOL'SHAKOV, 2000).

Análises do lixiviado de ADF têm sido frequentemente associadas ao estudo do impacto ambiental e riscos das ADF mostrando que estes resíduos teriam um pequeno potencial de contaminação das águas subterrâneas (BOYLE; HAM, 1990).

Dos estudos existentes sobre as areias descartadas de fundição para sua caracterização e em aplicações de reuso, se destacam os seguintes impactos ambientais levantados:

- Serem classificadas como Resíduos Classe II-A, não-inertes não-perigosos, de acordo com a NBR 10.004 da ABNT;
- As grandes quantidades geradas associadas ao seu processo produtivo – para cada tonelada de metal fundido estima-se a mesma quantidade de excedentes de fundição;
- A necessidade de ocupação de áreas para disposição ou aterramento, contribuindo para a desertificação;

- A contribuição para a redução da disponibilidade de recursos naturais pelo aumento da necessidade de extração de recursos naturais, tais como areia, bentonita, pó de carvão e água.

Outros impactos podem ser levantados tais como a contaminação de solo e água para processos de fundição onde seja elevada a utilização de metais pesados, como cromo, chumbo ou compostos orgânicos, tais como resinas fenólicas ou furânicas. Por isso, Bonet (2002), Watanabe et al. (2002) e Biolo (2003), concordam que a ADF constitui-se em um grande problema ambiental para as empresas do setor metal mecânico por ser um resíduo classificado como não inerte que necessita de grandes áreas para disposição implicando em impactos ambientais ligados ao alto consumo dos recursos naturais (areia, bentonita, pó de carvão) e à criação de locais para aterro, provocando a desertificação de áreas de preservação ou produtivas.

Salamzadeh (1985), explica que em um aterro onde são dispostos resíduos de fundição, uma grande quantidade é relativamente inerte e que não seriam esperados sérios problemas ambientais na qualidade da água subterrânea. Resultados de testes de lixiviação executados por Boyle et al. (1989) indicam que as concentrações dos parâmetros analisados encontraram-se dentro dos padrões para águas potáveis, e que, na média, apenas os parâmetros de ferro e manganês excederam os padrões de potabilidade. Ao se comparar os lixiviados obtidos para as amostras de areia de fundição com lixiviados de solos naturais Winkler e Bol'shakov (2000) e Walden (2003) encontraram resultados semelhantes em suas pesquisas.

Das pesquisas realizadas para o uso em solos agriculturáveis, Dungan et al. (2006) concluíram que as concentrações de metais foram maiores no solo estudado do que nas areias de moldagem e macharia, com exceção da areia verde da amostra da fundição de bronze, onde são esperados outros elementos presentes em maior concentração devido às matérias-primas utilizadas.

O estudo apontado nas Tabelas 1 e 2 mostram que quando analisadas sob o mesmo critério de aceitação ambiental as próprias matérias-primas e solos naturais apresentam valores similares a ADF e acima do valor máximo permitido, o que impossibilitaria seu manuseio e extração (CARNIN et al., 2007).

Tabela 1 Solubilização de amostras de solos naturais (Joinville-SC)

| Parâmetros<br>Analisados | Resultados do solubilizado de solo de locais analisados<br>(mg/L) |       |        |               |        |             |            |
|--------------------------|---|-------|--------|---------------|--------|-------------|------------|
|                          | Pirabeiraba   | Itaum | Iriirú | Costa e Silva | Centro | Boehmerwald | Bom Retiro |
| Alumínio                 | 1,13  | 16,5  | 37,1   | <LQ           | <LQ    | 0,32        | <LQ        |
| Cromo                    | 0,014   | 0,03  | 0,07   | <LQ           | 0,014  | 0,014       | --         |
| Fenóis                   | <LQ   | <LQ   | <LQ    | <LQ           | <LQ    | <LQ         | <LQ        |
| Ferro                    | 0,3   | 4,13  | 8,97   | <LQ           | <LQ    | 0,05        | --         |
| Manganês                 | <LQ   | <LQ   | <LQ    | 0,03          | <LQ    | <LQ         | --         |
| Sódio                    | 1,38  | 0,87  | 1,19   | 1,03          | 23,8   | 0,01        | 19         |
| Sulfato                  | 5   | 2     | 3      | <LQ           | <LQ    | 2           | 25         |

LQ = Limite de Quantificação

Fonte: (CARNIN et al., 2007)

Tabela 2 Solubilização de ADF e suas matérias primas

| Parâmetros<br>Analisados | Resultados do solubilizado de matérias primas do<br>processo de fundição (mg/L) |                 |                      |                      |                 |
|--------------------------|---|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------|
|                          | Areia<br>Verde de<br>Fundição   | Areia<br>Lavada | Bentonita<br>Natural | Bentonita<br>Ativada | Pó de<br>Carvão |
| Alumínio                 | 11,2  | 0,044           | 11,5                 | 6,59                 | <LQ             |
| Bário                    | -   | 0,043           | 0,24                 | 0,091                | 0,12            |
| Cádmio                   | -   | <LQ             | <LQ                  | <LQ                  | <LQ             |
| Cromo                    | 0,04  | <LQ             | <LQ                  | 0,024                | <LQ             |
| Fenóis                   | <LQ   | <LQ             | <LQ                  | <LQ                  | <LQ             |
| Ferro                    | 98,2  | <LQ             | 1,98                 | 3,15                 | <LQ             |
| Manganês                 | 0,09  | <LQ             | 0,032                | <LQ                  | 0,19            |
| Sódio                    | 72  | 5,64            | 31,1                 | 7,28                 | 3,58            |
| Sulfato                  | 9,5   | 10              | 48                   | 4                    | 33              |

LQ = Limite de Quantificação

Fonte: (CARNIN et al., 2007)

Winkler e Bol'shakov (2000) descrevem que a mistura resultante de areia e ligante tem propriedades hidráulicas semelhantes às das misturas areia e bentonita que são utilizados como camadas de barreira nos EUA. Estas propriedades hidráulicas podem auxiliar na compreensão dos impactos ambientais decorrentes da disposição de ADF no solo, entendendo como os passivos ambientais gerados por estes resíduos podem ser mais bem gerenciados, compreendendo seus reais riscos de contaminação de solo e água subterrâneas, bem como do uso do material disposto.

### **1.3 CONTEXTO LEGAL**

A avaliação da contaminação do solo e da água subterrânea no Brasil decorrente da formação de passivos ambientais pela deposição de resíduos diretamente sobre o solo, como em geral apresentam-se as ADF, foi regulamentada pelo governo federal. O Conselho Nacional de Meio Ambiente dispõe da Resolução nº 396 (CONAMA, 2008) sobre valores orientadores para solos e águas subterrâneas e da Resolução nº 420 (CONAMA, 2009) que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas. Para a realização de projeto e implantação aterros de resíduos perigosos e não perigosos são utilizadas as normas NBR 8418; 8419; 8849 10.157; 13.896; 15.113; (ABNT, 1984a); (ABNT, 1996); (ABNT, 1985); (ABNT, 1987); (ABNT, 1997); (ABNT, 2004d). Em 2010, o governo federal aprovou a Lei Federal nº 12.305 que dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos que incentiva a regularização de áreas para disposição e prioriza a redução, o reuso e a reciclagem de resíduos.

No que tange a utilização destes resíduos, em 2006 os trabalhos para regulamentação da reutilização das Areias Descartadas de Fundação ganharam apoio junto a ABIFA (Associação Brasileira de Fundação) com a organização do setor produtivo através do levantamento de informações da geração do resíduo bem como da mobilização junto a órgãos públicos e articulação junto a ABNT para estruturar atual CB-059 e respectiva CE-59:001.01 - Comissão de Estudo Resíduos de Fundação visando o desenvolvimento de normas de reuso e armazenamento dos resíduos de fundição. Atualmente estão publicadas as normas NBR 15702 – Areia descartada de Fundação – Diretrizes para aplicação em asfalto (ABNT, 2009) e em aterro sanitário e NBR 15984

– Areia descartada de Fundição – Central de processamento, armazenamento e destinação (ABNT, 2011).

Em 2007, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo lançou a Decisão de Diretoria nº. 152/2007/C/E que permite a reutilização deste resíduo no estado em aplicações de fabricação de asfalto e artefatos de concreto e também determina como podem ser gerenciadas as áreas (ou atuais passivos) de disposição sem a remoção total das areias ali descartadas (CETESB, 2007).

O Conselho Estadual de Meio Ambiente de Santa Catarina (CONSEMA) publicou em 2008 a resolução nº 011 que estabelece critérios para a utilização de Areia Descartada de Fundição de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto não estrutural (CONSEMA,2008). A elaboração desta resolução contou com a participação da Câmara Técnica de Resíduos e das fundições da região.

Assim, no contexto científico, legal e social, no Brasil, as fundições que realizam a avaliação de seus passivos ambientais encontram deficiências na adoção de padrões coerentes com as medidas mitigatórias necessárias para a compreensão e tratativas adequadas para estes locais de deposição. De modo análogo, a aprovação de atividades de destinação das ADF mediante órgãos ambientais também é comprometida pela dificuldade de determinação do grau de impacto ou risco ambiental causado por esta disposição.

## 1.4 QUESTÃO DA PESQUISA

Tendo em vista que o gerenciamento de passivos ambientais decorrentes da disposição de ADF tem sido feito por meio do monitoramento de água e solo e que os resultados científicos apontados revelam o baixo risco de contaminação, a seguinte questão é colocada em prática nesta tese:

***A contaminação de solo e águas subterrâneas decorrente da disposição de Areia Descartada de Fundição é alterada pela presença de aditivos em sua composição?***

Como grande parte do material científico existente concentra-se em caracterizar e estudar a reutilização das ADF, assim como a legislação se preocupa com o regramento do reaproveitamento desse material, os fatos revelam que o tema continua em desenvolvimento, e sendo assim, o aprofundamento da pesquisa fundamenta e justifica a execução desta tese.

Sobre esta ótica este estudo se insere no quadro de caracterização e valorização de resíduos industriais do programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina tendo em vista seus trabalhos realizados na busca do melhor gerenciamento e o comprometimento dos seus pesquisadores para com o desenvolvimento sustentável. Seus resultados visam fomentar soluções eco compatíveis para as areias descartadas de fundição produzidas no parque industrial catarinense e brasileiro como contribuição para elaboração das políticas de gerenciamento de resíduos em nível federal, estadual e municipal.

Para responder a questão desta tese, uma hipótese foi elencada tomando como fundamentação a composição das ADF e as propriedades de seus constituintes. A partir desta hipótese o estudo foi delimitado e objetivado para proporcionar sua execução.

### 1.4.1 Hipótese

A bentonita, presente na ADF, atua como material encapsulante e impermeabilizante quando disposta no solo.

## 1.4.2 Delimitações

Este estudo limita-se a avaliar a influência da bentonita perante aos resíduos de ADF provenientes do descarte da etapa de moldagem sendo este o maior volume gerado no processo de produção dentre outras ADFs definidas pela NBR 15702 (ABNT, 2009) como areias de macharia, areias de despoeiramento, exaustão ou varrição.

Não serão considerados outros resíduos do processo de fundição como refratários, escória e pó de acabamento de peças.

Este estudo limita-se a avaliar as ADF sem analisar os diferentes tipos de solos para sua disposição, considerando que pode ocorrer sinergia entre a ADF e as condições do solo tais como composição e condições geotécnicas.

Não serão considerados impactos provenientes da extração das matérias-primas e insumos das areias descartadas de fundição devido a sua baixa significância perante aos objetivos deste estudo.

## 1.4.3 Objetivos

Objetivo Geral:

Analisar e Avaliar a influência da bentonita presente na ADF sobre os riscos de contaminação de solo e água subterrânea decorrentes da disposição desta no solo.

Objetivos Específicos:

- Investigar o ciclo de vida da ADF e o risco de impacto ambiental da sua disposição no solo.
- Avaliar a relação entre a permeabilidade<sup>1</sup> e a percolação<sup>2</sup> das ADFs, como meio de contenção dos contaminantes.

---

<sup>1</sup> Permeabilidade – considerada como a velocidade de fluxo de líquido percolante pela ADF.

<sup>2</sup> Percolado – considera a qualidade (em concentração de contaminantes) do líquido percolante após a passagem pela ADF.

- Estudar a interação entre a bentonita e as areias descartadas de fundição.
- Estudar a relação entre a quantidade de bentonita na mistura de areia descartada de fundição e a permeabilidade do resíduo.

## 1.5 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese se organiza em quatro principais divisões: Introdução Geral, Fundamentação Teórica; Procedimentos Experimentais e seus Resultados e Discussão Geral e Conclusão.

No Capítulo 1, do qual faz parte essa seção, é apresentada a Introdução Geral que contempla a descrição da problemática associada ao tema das Areias Descartadas no Brasil por meio de levantar a sua fundamentação inicial proporcionando a justificativa e relevância deste estudo no contexto ambiental brasileiro. Juntamente, é apresentada a questão de pesquisa, a hipótese, as delimitações do estudo e objetivos.

A Fundamentação Teórica do Capítulo 2 foi elaborada visando dar ao leitor um panorama geral das Areias Descartadas de Fundição levantando as principais informações do seu ciclo de vida, desde a geração ao descarte, incluindo os aspectos fundamentais relacionados às questões ambientais e à bentonita, material de interesse deste estudo.

Os procedimentos experimentais adotados para investigação da tese foram divididos nos Capítulos 3, 4 e 5 e seus resultados submetidos à publicação por meio de periódicos. Estes capítulos contêm resumo, materiais e métodos, discussão e conclusão. Todo o referencial bibliográfico é citado ao final desta tese.

O Capítulo 3 apresenta a etapa preliminar que consistiu em investigar dentro do ciclo de vida da ADF a fase em que são gerados os riscos associados à sua disposição.

A partir dos riscos conhecidos de matérias primas, insumos e da ADF ao longo do processo produtivo, o Capítulo 4 consistiu em caracterizar o potencial de uma das matérias primas, neste caso a argila bentonita, presente na ADF oriunda do processo de moldagem como material impermeabilizante, mantendo-se os demais componentes da sua composição constantes.

Após essa caracterização foi realizado o estudo da relação da quantidade de bentonita com a impermeabilização das ADFs quando

dispostas em solo como fator limitante da percolação e contaminação de solo e águas subterrâneas.

Finalizando, o último Capítulo apresenta a discussão geral dos resultados contendo a conclusão geral do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 CICLO DE VIDA DAS AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO**

As Areias Descartadas de Fundição contribuem para os aspectos ambientais da atividade de produção desde a geração ao descarte final. Portanto, para proporcionar o entendimento comportamento do ciclo de vida das areias descartadas de fundição é preciso conhecer os aspectos essenciais do processo, além de questões de ordem social e econômica, conforme detalhado a seguir.

### **2.2 PANORAMA DO SETOR DE FUNDIÇÃO**

A fundição tem sido utilizada pelo homem há mais de quatro milênios A.C., embora há cerca de quatro décadas, a solidificação dos metais e suas ligas tenham começado a ser pesquisada dentro dos esquemas da metodologia científica (RIBEIRO, 2008).

Quando o homem percebeu as possibilidades que um mineral oferecia ao ser exposto ao fogo, a fundição se tornou a base fundamental de qualquer atividade humana. Todo desenvolvimento tecnológico ganhou velocidade a partir deste fato. Ele nos permitiu construir novas ferramentas para a agricultura e alimentar mais pessoas, criar estradas e a infra-estrutura, fabricar automóveis, caminhões e aviões. A primeira fundição do Brasil surgiu por volta de 1599 em Araçoiaba da Serra na região de Sorocaba, empreendida pelo homem simples, mas bom comerciante, Afonso Sardinha que aproveitou a abundância em minério de ferro e o entusiasmo pela pesquisa em minérios realizada por seu filho (MEDEIROS, 2009).

Ao longo dos anos, os mestres fundidores foram aperfeiçoando suas técnicas e a manufatura de metais. Entre estes estão métodos mais conhecidos como a fundição em areia, fundição em moldes permanentes (com coquilhas ou matrizes e moldes), fundição sob pressão (injeção de metais), fundição por centrifugação; fundição de precisão (micro fusão ou cera perdida); fundição por moldagem em gesso e fundição em casca ou Shell Molding.

Atualmente no Brasil existem cerca de 1400 fundições espalhadas por todo o território nacional e 97% do controle acionário

esta nas mãos de brasileiros. Até dezembro de 2011 o setor mobilizava mais de 60 mil postos de trabalhos diretos concentrados principalmente em fundições de médio e pequeno porte. O faturamento já alcançou a faixa dos 13 bilhões de dólares para uma produção de 3,4 milhões de toneladas ao ano e uma capacidade instalada de 5 milhões de toneladas ao ano (ABIFA, 2012).

Em termos de produção mundial o Brasil está em sétimo lugar, atrás da China, Estados Unidos, Índia, Rússia, Japão e Alemanha. Em termos de produção regionalizada São Paulo detém 35,7% Minas gerais 24,6% e Santa Catarina com 23,9% seguidos por Rio de Janeiro com 6,9% e Paraná e Rio Grande do Sul somando 5,6% (ABIFA, 2012).

## **2.3 PROCESSO DE FUNDIÇÃO**

Em linhas gerais, o processo de fabricação de peças metálicas por meio da fundição consiste em verter o metal líquido em moldes, com as características do modelo, confeccionados à base de areia. O processo tem início com a alimentação de argila, areia base, areia de retorno e aditivos necessários que entram no misturador para a adequada homogeneização dos componentes e de onde saem como areia de moldagem diretamente para a fase de preparação dos moldes onde os machos são colocados. A etapa seguinte consiste no vazamento do metal líquido nas caixas de moldagem. Após rápida transferência de calor entre o metal e a areia, ocorre o processo de separação peça - molde. Da separação, a areia é retornada ao processo para preparação da areia de moldagem e as peças metálicas são enviadas à etapa de acabamento e controle de qualidade (MATOS; SCHALCH, 2000).

Assim a fundição emprega nos seus processos modelos, moldes e machos que promovem às peças fundidas a sua conformação de acordo com as etapas existentes de moldagem, fusão e acabamento, descritas sumariamente a seguir:

- a) Modelos – O modelo trata-se de uma réplica perfeita da peça que será produzida acrescida nas dimensões de material para compensar a contração e usinagem. O modelo pode ser fabricado em madeira, metal, resinas ou outros materiais (PERINI, 1986).
- b) Machos - Algumas peças a serem fundidas podem apresentar detalhes ou cavidades. Neste caso são os machos colocados no interior dos moldes em areia que reproduzem os detalhes necessários para que após o vazamento e sua remoção do interior da peça deixem a forma

desejada. Os machos constituem-se de material sólido formado a partir de uma mistura de areia, catalisadores e ligantes químicos.

c) Moldes - O molde tem por função oferecer o formato negativo da peça na qual será vazado o metal líquido. “O molde é feito por empacotamento de areia, em torno do modelo, toda a estrutura estando contida numa caixa de moldagem. O molde é feito em duas partes: uma superior (caixa superior) e outra inferior (caixa inferior)” (CAMPO FILHO, 1978).

d) Moldagem – No processo de moldagem a produção de uma peça fundida de projeto simples é feita através das seguintes etapas: a partir do desenho da peça, fabrica-se o modelo, em torno do qual se compacta a mistura de moldagem, contendo areia obtida em depósitos naturais e aditivos como a argila e o pó de carvão, usando-se caixas de moldagem para suportar as faces laterais do molde; remove-se o modelo, colocam-se os machos em posição, fecham-se as diferentes partes do molde e se verte o metal na cavidade resultante. O material da moldagem mantém a forma da cavidade até a solidificação do metal vazado nele (KONDIC, 1973).

e) Fusão - Na fusão a provisão do metal é feita pela alimentação do metal líquido por meio de um sistema de canais existentes no molde. Os canais de alimentação alargados ou massalotes são abertos de modo a permitir que o metal escorra para a cavidade do molde. O vazamento deve ser constante impedindo a sedimentação de escória, material insolúvel do ferro, no interior do molde (CAMPOS FILHO, 1978).

f) Acabamento – Após o vazamento, solidificação e resfriamento, a peça passa pela etapa de desmoldagem por vibração. Nesta fase é removida a mistura de areia e machos queimados para finalizar o acabamento da peça. Este acabamento se compõe geralmente de etapas de remoção de canais de vazamento e massalotes, jateamento com granalha de aço e esmerilhamento de rebarbas que não compõe o dimensional do fundido a ser fornecido. Em alguns casos, dependendo das exigências do fundido, a peça ainda passa por etapas de tratamento de superfície e pintura.

De modo geral, as fundições brasileiras nos dias de hoje conseguem monitorar e controlar todas as etapas de fundição, por meio de setores da qualidade, de forma a garantir o processo e a inspeção final (MEDEIROS, 2009).

## 2.4 MATÉRIAS-PRIMAS DAS AREIAS DE MOLDAGEM

### 2.4.1 Areia para Fundição

Em Santa Catarina foram produzidas aproximadamente 803 mil toneladas de areia industrial no ano de 2.006, correspondendo a quase 90% de toda a produção da Região Sul do país de acordo com dados do DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Deste total cerca de 70% são destinados às indústrias de fundição, particularmente aquelas situadas no município de Joinville e região (FERREIRA; DAITX, 2003).

A areia base, assim chamada quando utilizada pela indústria de fundição, é usada para confecção dos machos no processo de macharia, e principalmente no processo de moldagem. As areias mais usadas são: areia de quartzo ou sílica ( $\text{SiO}_2$ ), encontrada em abundância na natureza, seguido por cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_5$  ou  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), as de zirconita ( $\text{ZrSiO}_4$ ) e as de olivina ( $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$ ). Seu consumo depende do tipo de peça a ser confeccionada. Caracterizada mineralogicamente como agregado fino e puro, com granulometria variando de 0,05mm a 2,0mm de diâmetro (GIANNINI, 1995).

O método para obtenção da matéria prima é o da lavra a céu aberto por painéis, com disposição do estéril e rejeitos do beneficiamento nos painéis esgotados. A lavra é realizada por desmonte mecânico do minério por pá carregadeira ou escavadeira hidráulica, com transporte do minério por caminhões até as instalações de beneficiamento. Antes da lavra do minério propriamente dita, é realizado um decapeamento da jazida, operação na qual é removida uma camada de cerca de 50 cm de solo orgânico, estocado para uso futuro na recuperação de painéis já lavrados (CASTRO, 2001).

O beneficiamento do minério para a produção de areia de fundição engloba as operações unitárias de peneiramento, deslamagem, atrição, classificação, desaguamento e secagem (CASTRO, 2001).

Entre as diversas etapas de produção de areias industriais a do beneficiamento é, provavelmente, a mais importante. Sua execução significa a remoção de impurezas e de frações sem utilização econômica. O principal material a ser separado corresponde à fração siltico-argilosa, indesejável por representar ou uma fonte de contaminação de alumínio, ferro e álcalis, na fabricação de vidros especiais e de produtos químicos, ou um material indesejável na produção de moldes de fundição (FERREIRA; DAITX, 2003).

## 2.4.2 Pó de Carvão

O pó de carvão ou elemento carbonáceo é um dos componentes da mistura que compõe a areia verde. Na indústria metalúrgica o pó de carvão utilizado na composição de areia de moldagem é conhecido como “cardiff”. Apresenta-se como material extremamente volátil e com grande poder de expansibilidade ao ser aquecido. A adição do pó de carvão na mistura visa principalmente reduzir a expansão da sílica, evitar a penetração do metal líquido no molde de areia verde e melhorar o acabamento superficial da peça (MELLO, 2004). As características do Pó de Carvão para a indústria de fundição, apontadas na Tabela 3, são determinadas pela CEMP – Comissão Especial de Matérias Primas, composta pela ABIFA – Associação Brasileira de Fundições.

Tabela 3 Características especificadas pela CEMP para o pó de carvão para fundição.

| Características           |         |
|---------------------------|---------|
| Voláteis (%)              | 20-34   |
| Carbono vítreo            | 4-10    |
| Cinzas (%)                | 8-30    |
| Enxofre (%)               | 1,5-30  |
| Umidade (%)               | 0,0-1,5 |
| Densidade aparente (kg/L) | 0,5-0,7 |

Fonte: (MELLO, 2004).

## 2.4.3 Ligantes

Os ligantes ou aglomerantes são utilizados para dar coesão, plasticidade e resistência suficiente aos moldes de fundição. Podem ser naturais como bentonita, óleos minerais, vegetais e animal, amidos ou sintéticas tal como: resinas fenólicas, furânicas, uréia-formaldeído (OKIDA, 2006).

A injeção de argilóides na areia de moldagem proporciona uma homogeneização instantânea, devendo-se isto ao envolvimento dos grãos da areia nova, à integração da bentonita através da mistura e ao amassamento da areia em alta velocidade.(PEREIRA, 2004)

Já o amido de milho, por exemplo, é um material orgânico encontrado na forma granular e também pode ser usado como aglomerante na mistura de moldagem. Ele é utilizado com a finalidade de fornecer plasticidade à areia verde e de manter sua umidade. O amido

de milho apresenta alguns efeitos benéficos na mistura da areia verde, como: aumento da plasticidade, redução dos efeitos de expansão térmica das sílicas, retenção da umidade necessária para manter o nível de compactabilidade, aumento da resistência à compressão a seco. Normalmente, utiliza-se o amido de milho somente em moldes muito grandes e que necessitam de muita plasticidade (MELLO, 2004).

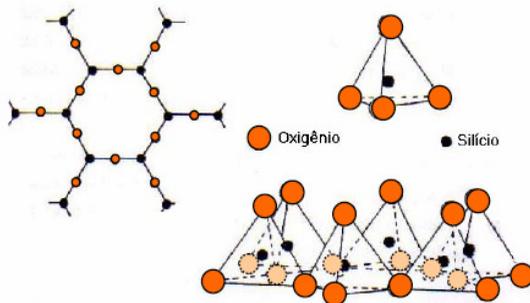
## **2.5 A BENTONITA E A FUNDIÇÃO**

A bentonita, um argilomineral constituído basicamente de montmorilonita do grupo esmectita, tem participação fundamental dentro do processo de fundição, especialmente no tocante a moldagem, atividade no qual esta argila auxilia no objetivo final, que é obter o produto fundido após o vazamento do metal líquido.

### **2.5.1 Argilas**

Argilas são, essencialmente, compostas por partículas cristalinas extremamente pequenas (geralmente menores que 2 ou 4 micrômetros) de um ou mais membros de um pequeno grupo de minerais que são comumente conhecidos como os argilominerais. Estes minerais são essencialmente silicatos de alumínio hidratado, com magnésio ou ferro com álcalis ou terrosos também presentes como componentes essenciais em alguns deles. Algumas argilas são compostas de um único mineral, mas em muitas existe uma mistura deles. Além dos minerais algumas argilas contêm quantidades variáveis minerais não argilosos, como quartzo, calcita, feldspato e pirita. Além disso, muitas argilas contêm matéria orgânica e sais solúveis em água. Os minerais cristalinos são os componentes essenciais de praticamente todas as argilas e, portanto, os componentes que determinam em grande parte de suas propriedades (GRIM, 1962).

De acordo com o tipo de rocha mãe e as condições de decomposição, podem-se ter diferentes tipos de argilominerais. A estrutura dos argilominerais está constituída por duas unidades fundamentais: tetraedros e octaedros. As unidades formadas por tetraedros possuem composição  $\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_4$ , que é a fórmula da sílica hidratada, componente de todas as argilas, está representada na Figura 2 (VIOTTI, 2006).



**Figura 2** Unidade fundamental dos argilominerais

Fonte: (VIOTTI, 2006).

### 2.5.1.1 Classificação

Os argilominerais são classificados em grupos ou famílias em função das suas composições químicas e das características da estrutura cristalina apresentados; ou seja, os argilominerais se classificam em função de como estão organizadas as diferentes células unitárias como está demonstrada na Tabela 4.

Tabela 4 Classificação das argilas segundo tipo e grupo de argilominerais

| <b>Elementos Dominantes</b>                             | <b>Tipo</b>  | <b>Grupo</b>   |
|---|--|--|
| Al  | 1:1  | Caulinita ou candita                                   |
| Al  | 1:1  | Serpentinas  |
| Mg, Fe <sup>2+</sup>                                    | 2:1  | Talco-pirofilita                                       |
| SiO <sub>2</sub>  | 2:1  | Micas  |
| Al, Mg, Na, Fe <sup>2+</sup>                            | 2:1  | Esmectitas ou montmorilonitas                          |
| Mg, Fe <sup>2+</sup> , Al, Fe <sup>3+</sup>             | 2:1  | Vermiculitas   |
| Mg, Fe, Al  | 2:1  | Cloritas   |
| Mg, Al  | 2:1  | Paligorsquita ou sepiolita                             |
| Mg, Fe <sup>2+</sup> , K, Al, Fe <sup>3+</sup> , Na, Ca | Regularmente<br>interestratificada<br>Irregularmente<br>interestratificada | Ilita-montmorilonita<br>Montmorilonita-<br>vermiculita |
| Mineralóides  | 2:7  | Alofanos   |

Fonte: (VIOTTI, 2006).

### 2.5.2 Propriedades e Caracterização das Argilas

Não é possível descrever uma argila por um número pequeno de propriedades. Os fatores que controlam as propriedades de uma determinada argila são: composição mineralógica; distribuição granulométrica das partículas; teor de eletrólitos, dos cátions trocáveis e dos sais solúveis; natureza e teor dos componentes orgânicos; características texturiais dos depósitos argilosos, tais como forma dos grãos de quartzo, grau de orientação ou paralelismo das partículas dos argilominerais, silicificação e outros (OLIVEIRA, 2003).

A capacidade de troca catiônica (CTC), uma das propriedades analisáveis das argilas ou aluminossilicatos, é a quantidade de íons, particularmente cátions, que este pode adsorver e trocar. É uma das propriedades mais importantes, que resulta do desequilíbrio das cargas

elétricas na estrutura cristalina devido às substituições isomórficas, às ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e à interação dos íons  $\text{H}_3\text{O}^+$  com as cargas nestas ligações quebradas. Para neutralizar estas cargas, existem cátions trocáveis, que estão fixos eletrostaticamente ao longo das faces e entre as camadas estruturais. A afinidade dos materiais trocadores de íons está relacionada com a carga e o tamanho dos íons em solução. O poder de troca de um cátion será maior, quanto maior for a sua valência e menor a sua hidratação. A força com que um íon é atraído é proporcional à sua carga iônica e por consequência, íons de maior valência são mais fortemente atraídos pelo material (OLIVEIRA, 2003).

A CTC é medida em termos de miliequivalentes (meq) por grama ou mais frequentemente por 100 gramas em meio aquoso a pH 7. Em argilas os cátions trocáveis comumente são cálcio, magnésio, hidrogênio, potássio, amônio e sódio, frequentemente na ordem relativa de abundância no material. Os ânions encontrados geralmente são sulfato, cloro, fosfatos e nitratos (GRIM, 1962). A Tabela 5 apresenta CTC típicas de aluminossilicatos determinados pelo método de saturação com o cátion amônio.

Na mineralogia a medida da CTC é importante porque a natureza dos íons trocáveis pode influenciar substancialmente nas propriedades físicas do material.

Segundo Ronquim (2010) quanto maior a CTC de um solo mais nutrientes, recebidos de adubações, ele consegue reter contra a lixiviação imposta pelo clima tropical. A CTC pode ser expressa como “CTC total” quando considerar todos os cátions permutáveis do solo ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ). O  $\text{H}^+$  só é retirado da superfície de adsorção por reação direta com hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) originando água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). A soma de bases trocáveis (SB) de uma argila representa a soma dos teores de cátions permutáveis, exceto  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  ( $\text{SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$ ). Denomina-se saturação por bases (V%) a soma das bases trocáveis expressa em porcentagem de capacidade de troca de cátions:  $V(\%) = (100 \times \text{SB}) / \text{CTC}$ .

Tabela 5 Capacidade de troca catiônica (CTC) de aluminossilicatos

| <b>Argila</b>               | <b>CTC (meq/100g argila)</b> |
|-----------------------------|------------------------------|
| Caulinita                   | 3-15                         |
| Haloisita 2H <sub>2</sub> O | 5-10                         |
| Haloisita 4H <sub>2</sub> O | 10-40                        |
| Ilita                       | 10-40                        |
| Clorita                     | 10-40                        |
| Sepiolita - atapulgita      | 20-35                        |
| Esmectita                   | 80-150                       |
| Montmorilonita              | 80-200                       |
| Vermiculita                 | 100-150                      |

Fonte: adaptado de Oliveira (2003)

Outras propriedades, tais como as relacionadas com as características ópticas e de infravermelho, são particularmente importantes para a identificação dos argilominerais quando da utilização comercial dos materiais. A composição mineral das argilas pode ser determinada com base na difração de raios X, nas características de desidratação, nas reações ao aquecimento térmico (por análise térmica diferencial), nas propriedades ópticas, em espectros de absorção de infravermelho e em reações de coloração.

Outras propriedades dos solos, o que inclui as argilas, são especialmente úteis para a sua caracterização entre elas granulometria, os índices físicos e os limites de Atterberg.

A análise granulométrica ou granulometria visa determinar a distribuição das dimensões dos grãos tendo como resultado a curva granulométrica. O ensaio é padronizado pela ABNT. Já os índices físicos podem ser divididos em índice de vazios; porosidade, grau de saturação; umidade; peso específico úmido, saturado, submerso, seco e densidade dos grãos. Esses índices são especialmente importantes para avaliação das deformações que os materiais argilosos podem sofrer de acordo com as condições ambientais ou de compactação (ORTIGÃO, 1995).

Por volta de 1911, o agrônomo sueco Atterberg dividiu os valores de umidade que uma argila pode apresentar em limites correspondentes ao estado aparente do material. Esses limites definem a transição dos estados sólido, plástico e líquido das argilas (ORTIGÃO, 1995).

O limite de plasticidade é uma medida da quantidade de água que a superfícies das partículas podem absorver ligeiramente superior ao

que pode ser corrigido em uma condição muito rígida e que não separe e as partículas reduzindo significativamente as forças de atração entre elas. O limite de liquidez é a quantidade de água que pode ser mantida com rigidez e que não separa as partículas, de modo que não haja uma força substancial de ligação entre elas, além da água, pelo menos em parte no estado líquido, dentro dos poros (GRIM, 1962).

Atterberg mostrou que a diferença, em percentual, entre os limites de plasticidade e liquidez corresponde à amplitude da faixa de plasticidade e foi denominado Índice de Plasticidade. Já o Índice de Liquidez de um solo é definido como a relação do teor de água natural do solo (umidade) menos o limite de plasticidade para o índice de plasticidade (ORTIGÃO, 1995).

Ferrari (2005) reforça a correlação resultante da observação de que os solos são tanto mais compressíveis (sujeitos a recalques) quanto maior for o seu limite de liquidez. Tendo-se a compressibilidade expressa pelo índice de compressão ( $C_c$ ) através da correlação:  $C_c = 0,009(LL - 10)$ .

A permeabilidade também apresenta uma influência decisiva em muitas propriedades de engenharia dos solos e sedimentos. Os fatores que afetam a permeabilidade são a composição mineral, granulometria, textura, índice de vazios, cátions trocáveis, características do líquido percolante e do grau de saturação. Há uma correlação definida entre a composição do argilomineral e da ordem de grandeza da permeabilidade (GLOAGUEN, 2005).

A permeabilidade é definida na equação de Darcy pela condutividade hidráulica como a razão entre o fluxo e o gradiente hidráulico, sendo o fluxo volumétrico de água através do solo para um gradiente hidráulico unitário (FERREIRA; DAITX, 2003). Enquanto que a percolação refere-se ao movimento descendente da água no solo abaixo da sua superfície que ocorre na zona saturada é governado pelos mesmos parâmetros que regem o fluxo de água subterrânea podendo ser descrito também pela equação de Darcy. Em fluxos saturados ou não saturados, a percolação depende da permeabilidade e a permeabilidade depende do tamanho dos poros e da estrutura do solo (IWAI, 2005).

A determinação do coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica pode ser definida através de diversas metodologias, conforme apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 Métodos para determinação do coeficiente de permeabilidade.

| Determinação do coeficiente de permeabilidade |  |
|---|--|
| Fórmulas empíricas                            | Baseadas na Lei de Darcy   |
| No laboratório                                | Métodos diretos: permeâmetros<br>Métodos indiretos: ensaios de adensamento e ensaios de capilaridade |
| No campo                                      | Ensaio de bombeamento e ensaios de infiltração<br>Permeâmetro de Guelph                              |

Fonte: (FERREIRA e DAITX, 2003).

Os ensaios realizados em laboratórios para a determinação da permeabilidade utilizam permeâmetros de carga constante ou de carga variável. Os permeâmetros de carga constante são utilizados em materiais muito permeáveis, como areias e pedregulhos, neste ensaio a amostra é submetida a uma carga constante, até atingir a saturação e o fluxo de saída seja constante.(FERREIRA, 2006).

Estas configurações diferem principalmente no tipo de carga aplicada durante o teste (carga variável ou constante), método pelo qual a diferença de carga hidráulica é medido durante o teste, e o uso da câmara de compressão triaxial flexível ou permeâmetro de parede rígida (OMARI, 2004).

### 2.5.3 Bentonita

O termo bentonita foi pela primeira vez aplicado a um tipo de argila plástica e coloidal de uma rocha descoberta em Fort Benton, Wyoming-EUA. Embora, originalmente, o termo bentonita se referisse à rocha argilosa descoberta, atualmente designa argila constituída principalmente do argilomineral montmorilonita. Este argilomineral faz parte do grupo esmectita, uma família de argilas com propriedades semelhantes. O termo bentonita também é usado para designar um produto com alto teor de esmectita.

A bentonita pode ser cálcica ou sódica, e apresenta uma característica física muito particular: expande várias vezes o seu volume, quando em contato com a água, formando géis tixotrópicos. Alguns cátions provocam uma expansão tão intensa que as camadas dos cristais podem se separar até a sua célula unitária. O sódio provoca a expansão mais notável (LUZ; OLIVEIRA, 2005).

A composição de uma bentonita foi analisada por Braga (2008) através de fluorescência de raios-X de acordo com Tabela 7.

Tabela 7 Composição química (% em óxidos) das bentonitas em estudo.

| <i>Óxidos</i> | <i>Bentonita Cálcica</i> | <i>Bentonita Sódica</i> |
|---------------|--------------------------|-------------------------|
| Si            | 58,57                    | 59,70                   |
| Al            | 19,60                    | 20,20                   |
| Fe            | 15,30                    | 11,20                   |
| Na            | 0,48                     | 1,80                    |
| Mg            | -                        | 2,40                    |
| Ca            | 1,54                     | 1,90                    |
| K             | 0,60                     | 0,50                    |
| S             | 3,20                     | 2,60                    |
| Ti            | 1,10                     | 1,10                    |
| Cr            | -                        | 0,03                    |
| Ni            | -                        | -                       |
| Mn            | 0,05                     | 0,06                    |

Fonte: adaptado de Braga (2008).

Bentonitas, compostas essencialmente de montmorilonita, ou de fórmula estrutural  $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , são largamente usadas em areias de moldagem (GRIM, 1962).

Os principais usos da bentonita são apresentados a seguir (LUZ e OLIVEIRA, 2005):

- Agente tixotrópico de fluidos de perfuração de poços de petróleo e d'água;
- Pelotização de minérios de ferro;
- Aglomerante de areias de moldagem usadas em fundição;
- Descoramento de óleos vegetais, minerais e animais;
- Impermeabilização de bacias;
- *Pet litter*.

A bentonita apresenta partículas aglomeradas micro porosas, os fragmentos revelam que o material analisado possui tamanhos de partículas irregulares com aspecto quebradiço, comportamento esse próprio das argilas do grupo das esmectitas. Tanto a bentonita cálcica, Figura 3, quanto à sódica, Figura 4, apresentam morfologias semelhantes, pois ambas têm a mesma estrutura, diferindo apenas no cátion intercalado entre os tetraedros. Os fragmentos das bentonitas mostram que suas superfícies são irregulares apresentando ondulações que indicam o empilhamento das folhas octaédricas (BRAGA, 2008).

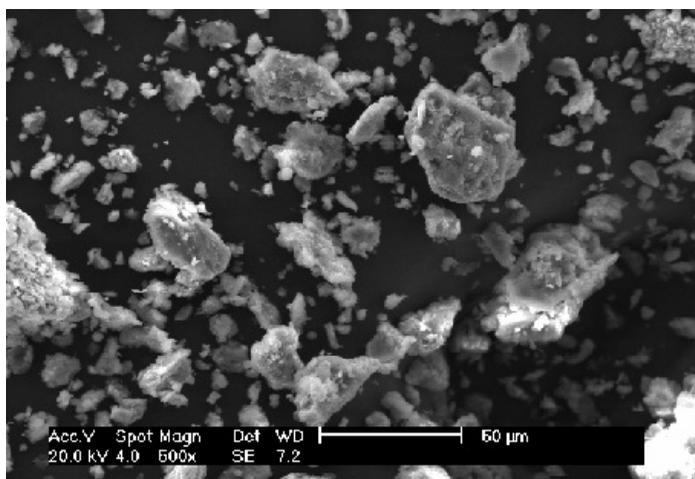


Figura 3 Microscopia eletrônica de varredura da bentonita cálcica.  
Fonte: (BRAGA, 2008)

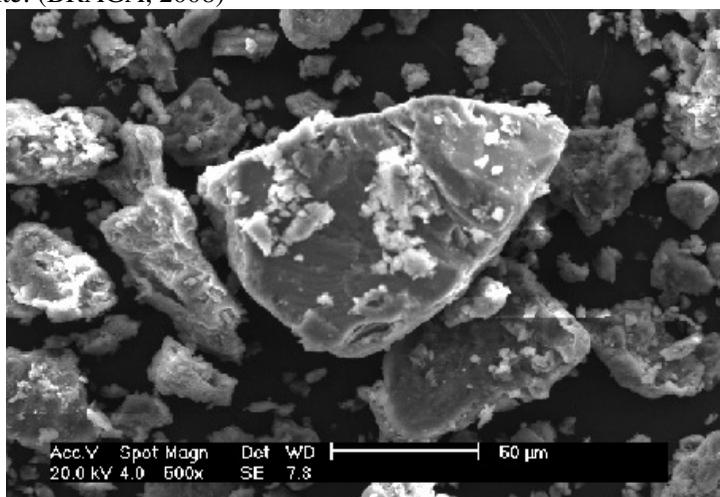


Figura 4 Microscopia eletrônica de varredura da bentonita sódica.  
Fonte: (BRAGA, 2008)

Do ponto de vista estrutural, os argilominerais da bentonita são constituídos de unidades empilhadas que compreendem camadas de sanduiches de íons coordenados octaedralmente entre duas camadas de íons coordenados tetraedralmente. A distância entre estas camadas variam muito dependendo da natureza do cátion e da umidade relativa

podendo se separar totalmente na presença de  $\text{Na}^+$  um pouco como ocorre com o cátion  $\text{Ca}^{2+}$ , uma vez que o espaçamento mínimo entre as lamelas adjacentes corresponde, aproximadamente, ao diâmetro atômico do cátion adsorvido. Sendo assim, a distância mínima entre as lâminas para o argilomineral esmectítico é de 0,96 nm (LUZ; OLIVEIRA, 2005).

As bentonitas sódico-cálcicas, denominadas mistas, incham de forma moderada e formam géis de menor volume do que as bentonitas sódicas. Dessa forma, as bentonitas são classificadas como de alto inchamento ou sódica, baixo inchamento ou cálcica e de moderado inchamento ou tipo mista (LUZ ; OLIVEIRA, 2005).

Uma das formas de caracterizar a bentonita (esmectita sódica) é baseada na sua capacidade de inchamento, quando se adiciona água. A bentonita, tendo o sódio como elemento dominante ou como um íon tipicamente trocável, apresenta uma alta capacidade de inchamento e tem as características de uma massa, quando adicionada água (LUZ; OLIVEIRA, 2005).

As considerações sugeridas pelos resultados experimentais de Komine (2004), propuseram uma avaliação simplificada da condutividade hidráulica através da correlação com o inchamento volumétrico da montmorilonita. Através deste método de avaliação a condutividade hidráulica de materiais poderia ser predita em diferentes densidades e teores de bentonita. Portanto, Esse método de avaliação seria útil para a concepção teores de bentonita e densidades de compactação visando alcançar baixos valores de permeabilidade. Esse estudo se mostra importante uma vez que a permeabilidade de materiais porosos depende das propriedades do fluido. Assim, a permeabilidade será afetada por quaisquer alterações nas suas propriedades. A viscosidade e o peso específico do fluido permeativo são principalmente afetados pela temperatura. O material poroso, por outro lado, é alterado sempre que as propriedades dos seus componentes são alteradas (OMARI, 2004).

Em argilas ativas, a permeabilidade intrínseca é afetada por mudanças micro estruturais que dependem do tipo de fluido dos poros (VAUNAT; GENS, 2005).

Em bentonitas compostas de montmorilonita, a característica estrutural e composição da montmorilonita podem variar, e também o caráter do cátion trocável pode variar. Neste caso, as propriedades físicas da bentonita vão variar dependendo da natureza da montmorilonita e do cátion trocável. Em alguns casos as argilas podem ter as propriedades coloidais relativamente moderadas (GRIM, 1962).

Segundo Santos (1975) quando o cálcio ou magnésio for o cátion trocável a película adsorvida na superfície da argila é de água muito rígida, com elevado grau de orientação ou cristalinidade, portanto a água pode exercer uma forte ligação em pequenas quantidades em contato com a bentonita.

Nas montmorilonitas o efeito do cálcio ou magnésio em comparação com o sódio para formar a películas de água rígida é o mesmo com aumento do limite de plasticidade. Contudo, este efeito pode ser compensado pelo cátion cálcio hidratado podendo causar uma redução deste limite e diminuição da área específica para a água livre agir como lubrificante, considerando a característica de inchamento existente das bentonitas, impossibilitando a passagem de água e influenciando a condutividade hidráulica.

Estudos realizados por Gloaguen (2005) identificaram a correlação dos íons bivalentes (cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ) com a condutividade hidráulica enquanto que a disponibilidade de sódio é associada a fenômenos de dispersão ou expansão das amostras estudadas.

#### 2.5.3.1 Contribuição Ambiental das Bentonitas

Diversos estudos comprovam a aplicação de bentonita como uma argila capaz de atenuar os impactos ambientais por suas propriedades físicas, químicas e estruturais. Ela tem sido usada há vários anos para fins de impermeabilização de fundações, diques de construção, depósitos de resíduos (KOCH, 2002). A tabela a seguir exemplifica alguns destes estudos e suas aplicações.

Tabela 8 Estudos relacionando bentonita e redução de impacto ambiental

| Autores                     | Aplicações  |
|-----------------------------|---|
| Azambuja (2004)             | Contenção de contaminantes em barreiras verticais |
| Braga (2008)                |   |
| Churchman et al. (2002)     | Adsorvente de contaminantes de Petróleo           |
| Dali-youcef et al.( 2006)   |   |
| Egloffstein (2001)          | Contenção de contaminantes                        |
| Fiori (2008)                | Clarificação de efluentes têxteis                 |
| Heineck et al. (2002)       | Barreiras Geosintéticas de Argila                 |
| Ito (2006)                  | Auxiliar bactericida                              |
| Koch (2002)                 | Contenção de contaminantes de carvão              |
| Lemos et al. (2005)         | Tratamento de resíduos nucleares                  |
| Lukiantchuki (2007)         | Encapsulamento de resíduos industriais            |
| Mahasneh e shawabkeh (2005) | Barreiras hidráulicas verticais                   |
| Nascimento (2006)           | Barreira impermeabilizante                        |
| Oliveira (2003a)            | Estabilização de metais                           |
| Ouhadi, et al.(2006)        | Hidratação de cimento                             |
| Rodrigues et al. (2004)     | Estabilização de resíduos oleosos                 |
| Santos (2008)               | Adsorção de metais pesados                        |
| Villar et al. (2005)        | Remoção de chumbo de efluentes                    |
|                             | Camada selante em solo residual                   |
|                             | Barreira de resíduos radioativos                  |

Fonte: primária, do autor.

Entretanto, os estudos acima não foram realizados com ADF e, não podem ser extrapolados para situações similares sem um estudo específico que avalie a capacidade da bentonita em atuar da mesma forma, na contenção de contaminantes atendendo a legislação ambiental no tocante a disposição de resíduos.

Contudo, muitas vezes a observância das normas legais para o descarte de resíduos ou para o encapsulamento de áreas contaminadas só é possível usando bentonita para contenção e vedação de sistemas percolantes. Nestes casos, a capacidade de troca iônica e o comportamento de inchamento da bentonita tornam-se importante. Essa avaliação pode ser realizada através de ensaios com azul de metileno ou avaliação do teor de argila ativa. Resultados de estudos recentes mostram uma evolução na melhoria das propriedades da bentonita com minerais de vedação em misturas, como, por exemplo, nas de bentonita-cimento. Na Alemanha, desde o início da década de 1980, bentonitas

são utilizadas para revestimento de aterros, isto é, para minimizar a condutividade hidráulica das camadas minerais (KOCH, 2002).

Estudos para avaliar os efeitos da aplicação da bentonita em solos pouco argilosos concluíram que quando adicionada, em pequenas quantidades, melhora significativamente as características físicas, físico-química e geotécnica destes. Dessa forma, podem desempenhar com sucesso a função selante (SANTOS, 2008).

As barreiras minerais para a base ou cobertura de aterros podem ser produzidas através da mistura de bentonita seca no solo com fresadoras poderosas previamente ou no local da obra (Figura 5).



**Figura 5. Aplicação de bentonita em misturas com solo**

Fonte: (KOCH, 2002)

Na contenção de resíduos contendo fenol, a bentonita sódica apresentou características semelhantes a da bentonita cálcica, isso aconteceu porque ambas têm a mesma estrutura, diferindo apenas no cátion intercalado entre os tetraedros. Sua área superficial, porém, apresentou valor muito menor. Nos resultados de isotermas de adsorção, a bentonita sódica apresenta melhor resultado, o que permite concluir que este adsorvente apresenta maior afinidade com as moléculas de fenol (BRAGA, 2008).

Em estudos de tratamento de efluentes têxteis a bentonita mostrou melhor adsorção e afinidade com compostos fenólicos, também

reduzindo a DQO e os parâmetros de poluição (DALI-YOUCCEF et al., 2006).

Bentonitas também foram analisadas recentemente em alguns países como candidatas para uso em contenção de resíduos radioativos. Misturas de areia e bentonita têm atraído a atenção de projetos ambientais japoneses devido a sua baixa permeabilidade (ITO, 2006).

Já as misturas de solo, utilizadas no desenvolvimento de plantas, são normalmente compostas por areia misturada com turfa, adubos e solo de superfície. No caso do uso de areia descartada de fundição a presença de argila na areia é benéfica, pois aumenta a capacidade do solo em reter água e nutrientes. E que no caso das aplicações em camadas intermediárias ou cobertura de aterro a mistura frequentemente encontrada entre areia e argila nas areias descartadas de fundição pode favorecer a adoção nesta atividade (WALDEN, 2003).

A interação com o processo de fundição aliada à contribuição desta argila na contenção de impactos ambientais mostra a bentonita como um fator de estudo importante dentro da problemática ambiental das areias descartadas de fundição, auxiliando na compreensão dos impactos ambientais.

### 2.5.3.2 Interação Bentonita e a Areia de Moldagem

No começo da atividade de fundição, o fundidor utilizava a técnica de fundição em molde permanente de pedra. Somente por volta do século XIX, quando foi necessário para a produção de sinos, foi introduzido o sistema de moldagem em areia é que se tem notícia do uso de argilas aglomerantes e da bentonita que permitiram o desenvolvimento de máquinas e equipamentos com maior nível de mecanização (MEDEIROS, 2009).

Sabe-se que o ligante é o principal constituinte de uma areia de moldagem, daí o esforço em se conhecer melhor o comportamento de cada tipo que delimita a aplicação de cada processo de moldagem Da bentonita, ligante utilizado na areia de moldagem a verde, exige-se uma série de propriedades: fornecer boa moldabilidade para a areia; apresentar baixa tendência para defeitos em fundição; fornecer boa desmoldabilidade e possuir alta durabilidade (GUESSER, 1982). A Tabela 9 apresenta as especificações da bentonita utilizada nos processos de fundição.

Tabela 9 Especificações de bentonita para fundição

| Características  | Sódica Natural | Sódica Ativada |
|--|----------------|----------------|
| Umidade original (%)                                       | 8-12           | 8-12           |
| Absorção de azul de metileno (mL)                          | Mín. 50        | Mín.50         |
| Densidade  | 0,70-0,85      | 0,65-0,80      |
| Teor de partículas grossas retido em 0,075 (%)             | Max. 15,0      | Max. 15,0      |
| Reação benzidina   | Azul intenso   | Verde          |
| Inchamento   | Mín. 30,0      | Mín. 30,0      |
| Estabilidade Térmica (550°C) (%)                           | Mín. 70,0      | Mín. 70,0      |
| RCV – Resistência Compressão a Verde (N/cm <sup>2</sup> )  | Mín. 12        | Mín. 13        |
| RTU – Resistência Tração a Úmido (N/cm <sup>2</sup> )      | Mín. 0,28      | Mín. 0,29      |
| Permeabilidade (cm <sup>4</sup> /g/min.)(a passagem de ar) | 140-160        | 160-205        |

Fonte: Adaptado de Luz e Oliveira (2005)

A composição típica de uma mistura de areia de moldagem que contém bentonita é apresentada na **Tabela 10**.

Tabela 10 Composição típica e propriedades da areia de moldagem

| Componente/Propriedade                  | Limites                 |
|---|-------------------------|
| Areia                                   | 70-80%                  |
| Água                                    | 2-4%                    |
| Argila                                  | 5-15%                   |
| Aditivos                                | 2-5%                    |
| Umidade                                 | 0-4%                    |
| Perda ao Fogo                           | 0,2-8%                  |
| pH                                      | 3-12%                   |
| Argila AFS                              | 40-150%                 |
| % Finos (passado pela peneira 200 Mesh) | 1-2%                    |
| Densidade                               | 1,0 ,6g/cm <sup>3</sup> |

Fonte: adaptado de AFS(1996).

A utilização de bentonita que não atenda as especificações necessárias ao processo de fundição e às características da relação areia-metal pode causar defeitos de fundição nos produtos como os apontados na Tabela 11.

Tabela 11 Defeitos de fundição relacionados ao tipo de bentonita

| <b>Defeito</b>     | <b>Bentonita com menor tendência</b> |
|--------------------|--------------------------------------|
| Escama de expansão | Sódica natural                       |
| Gases, pinholes    | Sódica natural                       |
| Erosão do molde    | Sódica natural                       |
| Trinca a quente    | Cálcica                              |
| Molde quebrado     | Sódica natural                       |

Fonte: (LAGO, 2009).

## 2.6 AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO

Após a moldagem das peças fundidas, as areias transformam-se em um resíduo sólido não perigoso segundo a norma NBR 10.004 a ser disposto ou reciclado pelas empresas fundidoras. (CASTRO, 2001).

Nos Estados Unidos, as fundições geram anualmente cerca de 10 milhões de toneladas de areia de fundição enquanto que no Brasil são geradas aproximadamente 2 milhões de toneladas de ADF (AFS,2012).

Como a areia utilizada para a moldagem é geralmente um material com partículas uniformes, normalmente entre 0,1 e 0,5 mm de diâmetro, dos resíduos de ADF, todo o material passa pela peneira 0,6 mm, mais de 50% das partículas passa pela peneira 0,3mm, sendo que a maioria é retida pela peneira de 0,15mm. O material fino, passado pela peneira de 0,2 mm representa cerca de 20% do resíduo de fundição. (WINKLER; BOL'SHAKOV, 2000)

Para a AFS (2003) as propriedades típicas para a areia de fundição seguem a Tabela 12.

Tabela 12 Propriedades de ADFs

| Propriedade                            | Limites               | Método               |
|--|-----------------------|----------------------|
| Peso Específico                        | 2,39-2,55             | ASTM D854            |
| Absorção, %                            | 0,45                  | ASTM C128            |
| Coefficiente de Permeabilidade cm/sec. | $10^{-3}$ - $10^{-6}$ | ASTM T215/ASTMD2434  |
| Limite de Plasticidade                 | Não plástica          | ASTM D4318/AASHTOT90 |

Fonte: adaptado de AFS (2003)

De acordo com Winkler e Bol'shakov (2000), as ADFs são também tipicamente caracterizadas de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13 Composição de ADFs obtida por fluorescência de raios-X

| Constituinte                   | Porcentagem (%) |
|--------------------------------|-----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 87,91           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,70            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,94            |
| CaO                            | 0,14            |
| MgO                            | 0,30            |
| SO <sub>3</sub>                | 0,09            |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,19            |
| K <sub>2</sub> O               | 0,25            |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,15            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,00            |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,02            |
| SrO                            | 0,03            |
| Perda ao Fogo                  | 5,15            |

Fonte: adaptado de Winkler & Bol'shakov (2000).

A maior parte das areias é disposta em aterros de resíduos não perigosos, em aterros municipais e privados, apenas 2% são considerados resíduos perigosos (DUNGAN et al., 2006). Nos Estados Unidos estima-se que apenas 28% da ADF são beneficiadas para uso e que a meta é redobrar até 2015 buscando a sustentabilidade na gestão de materiais usados na produção (AFS, 2012).

Boyle e Ham (1990) descreveram que os resíduos de fundição em um aterro não controlado são expostos à percolação, lixiviando ou dissolvendo os constituintes solúveis possibilitando a contaminação do lençol freático.

Fatores como a forma e a velocidade com que o poluente se integra ao meio físico são determinantes na concentração final em solos naturais, além do que, as movimentações dos resíduos sólidos perigosos geram problemas na sua estocagem final. A existência de um planejamento adequado ao meio físico também pode reduzir as consequências da degradação ambiental. Para Wright (2001), 90% da areia de fundição são dispostas em aterros como resíduos não perigosos. Entretanto, aspectos ambientais e econômicos têm demonstrado que fazer dos resíduos um atrativo do processo de fundição é uma maneira apropriada de reutilizá-los. E, das pesquisas complementares de Winkler e Bol'shakov (2000), os resultados indicaram também que as areias de fundição poderiam ser beneficiadas através de reuso sem causar impactos ao meio ambiente ou riscos a saúde humana.

### **2.6.1 Reaproveitamento das Areias Descartadas de Fundição**

Quando os resíduos de ADF advêm de moldes produzidos com ligantes químicos, especialmente resinas tóxicas, a disposição mesmo em aterros industriais é problemática, sendo a solução técnica ideal o reciclo pela regeneração térmica. Por esta razão, os órgãos ambientais têm de forma crescente recomendado o reaproveitamento das areias descartadas de fundição por parte das empresas fundidoras. Entretanto, o reciclo das areias de fundição requer equipamentos sofisticados, elevados investimentos o que aumenta o custo das areias de fundição. Por esta razão, as empresas do setor de fundição têm dificuldade para a implantação de sistemas eficientes de reciclo industrial, limitando-se a destorroar mecanicamente parte de suas areias já utilizadas para reciclo (CASTRO, 2001).

Em decorrência do controle dos impactos ambientais associados à necessidade da sustentabilidade dos processos tornou-se necessário aos fundidores alternativas, além da redução na geração pelos processos de recuperação e regeneração, para seus resíduos, em especial aqueles decorrentes das atividades de moldagem e desmoldagem, por gerarem maior quantidade. Estas alternativas têm sido encontradas nas aplicações de reuso, ou seja, a utilização dos resíduos em processos diferenciados dos da sua geração.

Torna-se importante ter em mente que a recuperação de áreas degradadas e a reutilização de resíduos que podem vir a serem matérias primas para uma etapa seguinte dependem da separação destes resíduos

do total em que estão agregados. O reaproveitamento pode tornar resíduos considerados inúteis em materiais não poluentes e rentáveis.

As fundições adotam processos de redução/valorização relativamente similares, porém com controles que podem variar entre si, como propriedades da mistura de areia e tipo de ferro fundido desejado. Assim, a aprovação de atividades de reuso de resíduos de fundição mediante órgãos ambientais deve ser executada individualmente para cada fundição, de modo a garantir que as propriedades funcionais dos produtos obtidos a partir de resíduos não sejam alteradas durante sua vida útil e que não proporcionem impactos ambientais negativos.

Esforços para desviar as areias descartadas de aterros e incentivar o seu uso em solos manufaturados e aplicações geotécnicas têm sido apoiadas nos Estados Unidos (DUNGAN et al., 2009).

No Brasil diversos estudos foram realizados, comprovando a reutilização das ADF. Pode-se dar destaque ao sul do Brasil onde as empresas da região, por apresentarem-se como grandes geradoras deste resíduo, desenvolveram diversos estudos (ARMANGE et al., 2005); (BIOLO, 2005) (BONET et al., 2003); (CARNIN, 2008); (CHEGATTI, 1999); (CHEGATTI, 2004); (MACIEL, 2005); (MELLO, 2004); (OKIDA, 2006); (PEREIRA et al., 2000); (QUISSINI, 2009); (SILVA, 2007); (TOLEDO, 2006) e (WATANABE, 2004). Tais pesquisas comprovaram a aplicação de areias descartadas de fundição em aplicações como asfalto, concreto, argamassa, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas (CHEGATTI et al., 2009).

De acordo com Walden (2003) as areias de fundição são reaproveitadas em atividades como: base e sub-base, fundações, concreto e produtos relacionados, implementos do solo, cimento Portland e para camadas e coberturas de aterros.

Conforme Walden (2003), Abichou et al.(1998), em virtude de a areia verde ser uma mistura de areia e bentonita, ela pode ser utilizada como de barreira hidráulica na construção das camadas utilizadas na cobertura de aterros ou como revestimento. O uso de areias em aplicações geotécnicas em aterros requer características hidráulicas específicas, incluindo a habilidade em transmitir água e/ou agir como uma barreira de drenagem. A argila ativa, encontrada particularmente nas areias verde, inibe a transmissão de umidade

Os testes realizados por Abichou et al.(1998) incluíram a comparação das propriedades de permeabilidade, condutividade hidráulica e compactação da areia de fundição perante a uma mistura de argila e areia comumente utilizada em aplicações geotécnicas. Os resultados demonstraram que as coberturas executadas com areia de

fundição tiveram melhor desempenho do que aquelas construídas com a mistura geotécnica usual. A percolação dos resíduos também foi significativamente mais baixa, considerando sua avaliação durante todas as estações do ano. Além disso, Técnicas apropriadas de horticulturas também devem ser utilizadas para ter sucesso nesta metodologia (SMITH et al., 1982).

Silva (2007) descreve que as areia de fundição são utilizadas nos EUA, notoriamente nos estados de Wisconsin, Michigan, Illinois, Iowa, Michigan, Minnesota, Pensilvânia, Ohio, Califórnia, Texas e Louisiana. Outros países como Canadá, Espanha, Japão e Nova Zelândia também ocorre à utilização de areia de fundição. Algumas das atuais práticas de reuso benéfico estão nestes países são listadas a seguir:

- Pavimentadoras de asfalto;
- Assentamento de tubulação;
- Cimento Portland;
- Cimentos e Argamassas em geral;
- Fabricação de tijolos;
- Produtos para correção de solo;
- Concreto pré fabricado;
- Preenchimento de sub base de estradas;
- Barreiras de contenção em estradas e trincheiras;
- Camadas intermediárias e de coberturas de aterros sanitários.

Contudo, mesmo com a existência de regulamentos para a reutilização das areias descartadas de fundição é necessário que o setor mantenha-se engajado na melhoria das normas existentes, no desenvolvimento de outras aplicações e na viabilização econômica buscando a sustentabilidade dos processos pela redução dos impactos ambientais e pelo aumento da competitividade (CHEGATTI et al., 2009).

## **2.7 ANÁLISE DE RISCO**

O risco é um termo que se refere à probabilidade de ocorrência de um efeito adverso a um organismo, sistema ou população, causado por circunstâncias específicas e devido à exposição a um agente (WHO, 2004). Os efeitos adversos podem ser de ordem econômica, ecológica, ou ainda incidir sobre saúde e segurança humana (GALVÃO FILHO, 2001).

Segundo Sogabe (2006), essa metodologia incorpora um conjunto de atividades que tem por objetivo agregar uma dimensão numérica (geralmente associada à probabilidade da ocorrência e suas consequências) e determinados eventos (contínuos ou pontuais no tempo) através do conhecimento das fontes geradoras dos agentes, o transporte e a transformação destes, a percepção/exposição dos receptores, a avaliação dos efeitos deletérios na saúde pública e no meio ambiente.

Os estudos quantitativos sobre riscos tiveram seu início a partir dos anos 1960, tomando por base disciplinas como toxicologia, epidemiologia, psicologia e engenharia (NETO; SARCINELLI, 2009). No caso do risco associado à saúde humana a análise de risco teve sua aplicação acelerada somente a partir de 1976, com a publicação da USEPA, “Carcinogenic Risk Assessment Guidelines”. Quanto ao risco ecológico, Galvão Filho (2001) afirma que essa categoria de análise se mostra ainda incipiente internacionalmente e praticamente inexistente no Brasil.

Cunha (2008) define a avaliação de risco como o estudo que quantifica o risco à saúde humana, decorrente da exposição a uma ou mais substâncias químicas no meio ambiente.

Uma das formas de relacionar a intensidade da poluição ambiental e os potenciais riscos à saúde humana é a metodologia de avaliação de risco à saúde humana (Risk Assessment Guidance for Superfund) proposta pela USEPA em 1989. A metodologia proposta pela USEPA, que considera efeitos carcinogênicos e não-carcinogênicos, características específicas de cada substância química, consiste na caracterização da probabilidade de ocorrência de efeitos adversos originados pela exposição do indivíduo a perigos ambientais (USEPA, 1989).

A proposta da USEPA consiste de métodos sistemáticos para avaliar dados disponíveis sobre efeitos adversos agudos e crônicos dos poluentes aos seres humanos em qualquer compartimento ambiental considerado tais como ar, solo, águas superficiais, águas subterrâneas (CASTILHOS et al., 2009)

A avaliação de risco à saúde humana é composta por quatro etapas: coleta e avaliação dos dados; avaliação de toxicidade; avaliação de exposição e por fim a caracterização e quantificação dos riscos (USEPA, 1989).

Para Castilhos et al. (2005), o principal objetivo do processo de avaliação de risco à saúde humana é elaborar uma estrutura básica organizadora de informações existentes, fornecendo dados que auxiliem

as decisões de gerenciamento ambiental, embasando as medidas que possam mitigar os impactos ambientais negativos.

Complementarmente a análise de risco ecológico é a probabilidade condicional da ocorrência de um acontecimento ecológico específico, associado à explicação das suas conseqüências ecológicas (WHO, 2004).

A análise de risco ambiental é vista como um conceito essencialmente novo, principalmente nos órgãos governamentais de países com experiência em análise de risco tecnológico e instituições de regulação. A formulação de metodologias de análise de risco ambiental evoluiu simultaneamente nos EUA, nos Países Baixos, no Canadá, Nova Zelândia e na Austrália, com variações nas estruturas metodológicas e nas etapas de execução, conforme as necessidades de cada país. No Brasil, a análise de risco ambiental vem sendo uma opção adotada por órgãos ambientais em processos de licenciamento em decorrência do crescimento industrial e da necessidade de da limpeza e a remediação de locais contaminados com substâncias, permitindo o desenvolvimento de programas de gerenciamento (CHAVES; MAINIER, 2005). Recentemente foi publicada a Resolução CONAMA nº 420 que incluiu etapas de avaliação de risco específicas para áreas contaminadas, seguindo mesmas diretrizes já adotadas pela CETESB e pela EPA.

A avaliação de risco ecológico, geralmente conduzida seguindo o “Guidelines for Ecological Risk Assessment”, publicado pelo EPA em 1998 inclui três fases. Conforme USEPA (1989), o processo se inicia com o planejamento, momento no qual os avaliadores de risco determinam, entre outros pontos, quem, o que e quando existe risco, quais os ambientes de interesse e os efeitos ecológicos.

Na primeira fase o foco é dado à formulação do problema, e nesta etapa as informações são reunidas de forma a auxiliar a determinar o que em termos de plantas e animais está em risco e o que necessita ser protegido.

A fase dois consiste na análise, ou seja, é a determinação de quais plantas e animais estão expostos e o grau ou dose de exposição, e se esse nível de exposição é passível ou não de causar efeitos ecológicos nocivos nos cenários avaliados.

A terceira fase é denominada caracterização de risco, e inclui dois componentes principais: estimativa do risco e descrição do risco. O primeiro trata de combinar perfis de exposição e efeitos de exposição, e o segundo componente provê informações importantes para interpretar os resultados do risco e identificar um nível de efeitos nocivos em plantas e animais de interesse.

A comparação com marcos de referência usualmente serve para identificar contaminantes, meio e receptores que podem estar em risco e que poderiam requerer investigações mais aprofundadas. De modo geral, se as concentrações do marco de referência não são excedidas, análises adicionais do contaminante e do receptor ecológico não se justificam (SAMPLE et al., 1998).

Em concordância com Chaves e Mainier (2005) isto quer dizer que a inexistência da definição de uma metodologia ou de padrões comparativos causa problemas no processo de licenciamento como maior tempo para análise, assim como a ausência de garantias que os resultados do risco ambiental estejam dentro dos limites de sustentabilidade garantindo assim todas as etapas de manejo dos resíduos até mesmo a garantia da sua reutilização ou reciclagem.

## **CAPÍTULO 3 AVALIAÇÃO DE RISCO DO CICLO DE VIDA DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO**

Remete à etapa preliminar dos procedimentos experimentais adotados que consistiu em investigar dentro do ciclo de vida da ADF quando e como o risco à saúde humana e de impactos ao ecossistema se manifestam para que a partir deste conhecimento possam ser elencados e caracterizados parâmetros de controle para a fase de descarte.

### **3.1 RESUMO**

A avaliação de risco visa determinar risco ecológico e a saúde humana associados aos ecossistemas, em decorrência de certa atividade. Neste horizonte, este artigo aborda o desenvolvimento de uma avaliação de risco dentro do ciclo da areia descartada de fundição, considerando valores referenciais adotados por organismo internacional, a Agência de Proteção Ambiental dos EUA e valores da investigação da resolução CONAMA n.º 420/09. A metodologia partiu da determinação da concentração dos principais parâmetros constituintes (alumínio, bário, cádmio, chumbo, cromo, fenol, ferro, fluoretos e manganês) das ADF ao longo do processo produtivo, considerando o ciclo de geração desse resíduo, em ensaios de massa bruta, lixiviação e solubilização. Os resultados das análises de laboratório foram então inseridos em software no qual foram executadas as avaliações de risco à saúde humana pela metodologia USEPA, e ecológico por meio da comparação dos resultados com valores referenciais de legislações. A partir dos resultados verificou-se o comportamento das amostras analisadas, ponderando se ultrapassavam ou não os limites de referência. O estudo revelou que na avaliação do risco à saúde humana o risco carcinogênico foi o mesmo desde as matérias primas até o resíduo final, o risco não carcinogênico para os resíduos de ADF foram superiores ao risco das matérias primas para os valores obtidos dos ensaios de massa bruta e solubilização. O resultado da avaliação de risco ecológico mostrou que os valores risco crescem ao longo do processo de geração de ADF e que decaem na etapa de descarte dos resíduos.

Palavras-chave: Resíduos; Areia Descartada de Fundição, Avaliação de risco ecológico, Avaliação de risco à saúde humana, Ciclo de vida.

## **3.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.2.1 Caracterização do Ciclo de Vida da ADF**

A primeira etapa deste estudo consistiu na elaboração de um inventário que contemplou a caracterização do ciclo de vida da ADF, desde as suas matérias primas até a etapa de descarte, com ênfase para o resíduo do processo de areia de moldagem considerado o mais significativo em termos de volume gerado pelas fundições e objeto de avaliação específica no próximo capítulo.

Para determinar as entradas e saídas relacionadas ao ciclo das ADF foi desenvolvido o fluxograma que contemplou a definição de pontos de amostragem levando em consideração como entradas as matérias-primas e pontos intermediários do processo de produção, e como saídas os pontos nos quais as areias são descartadas como resíduos.

Para definir os elementos químicos determinantes na caracterização do impacto ambiental das ADF foram realizados estudos preliminares sobre as suas características ambientais com apoio de Florido (2007) tendo em vista os elementos que determinaram a classificação dos resíduos como Classe II-A e os padrões da Resolução nº 11 do Conselho Estadual de Meio Ambiente de Santa Catarina (CONSEMA, 2008).

Desta forma, para caracterizar o fluxograma de geração das amostras os parâmetros alumínio, bário, cádmio, chumbo, cromo, fenol, ferro, fluoreto e manganês foram analisados através dos ensaios de massa bruta, lixiviação (NBR 10.005) e solubilização (NBR 10.006).

A coleta foi realizada em triplicata e seguindo a NBR 10.007 (ABNT, 2004e). Cada amostra conteve aproximadamente 3 kg, os métodos empregados para a análise constam no Quadro 1 bem como o limite mínimo de quantificação de cada parâmetro da análise laboratorial.

Quadro 1 Métodos analíticos empregados na caracterização das amostras

| Parâmetro   | Método analítico                                  | Limites de Quantificação |                                 |
|-------------|---|--------------------------|---------------------------------|
|             |   | Massa bruta (mg/kg)      | Lixiviado e Solubilizado (mg/L) |
| Alumínio    | Standard Methods 20 <sup>a</sup><br>Edição 3111 D | 2,5                      | 0,10                            |
| Bário       | Standard Methods 20 <sup>a</sup><br>Edição 3111 D | 5,0                      | 0,20                            |
| Cádmio      | Standard Methods 20 <sup>a</sup><br>Edição 3111 B | 0,025                    | 0,001                           |
| Chumbo      | Standard Methods 20 <sup>a</sup><br>Edição 3111 B | 0,25                     | 0,010                           |
| Cromo total | Standard Methods 20 <sup>a</sup><br>Edição 3111 B | 0,75                     | 0,030                           |
| Fenol total | Standard Methods 20 <sup>a</sup><br>Edição 5530   | 0,025                    | 0,025                           |
| Ferro       | Standard Methods 20 <sup>a</sup><br>Edição 3111 B | 0,7                      | 0,025                           |
| Fluoretos   | EPA 300.1   | 2,2                      | 0,10                            |
| Manganês    | Standard Methods 20 <sup>a</sup><br>Edição 3111 B | 0,12                     | 0,005                           |

### 3.2.2 Avaliação do Risco à Saúde Humana

Para a avaliação de risco à saúde humana utilizou-se a metodologia da USEPA que utiliza o cálculo dos riscos e aporte de contaminantes conforme descrito a seguir com auxílio do software SADA (UNIVERSITY OF TENNESSEE, 2009), disponível para estudos científicos seguindo os testes preliminares realizados com a ADF oriunda do processo de moldagem efetuados com auxílio de Bail et al. (2010).

Para o cálculo do aporte diário de cada substância para o cálculo da análise de risco à saúde humana é necessário definir o cenário de exposição. Neste caso foi definido o residencial, pois reflete condições mais restritivas de exposição em comparação com o cenário industrial, por exemplo. Foram consideradas como vias de contaminação a ingestão, inalação e o contato dérmico.

Após as análises laboratoriais de massa bruta, lixiviação e solubilização, foi considerada a maior concentração entre a triplicata em cada ensaio para representar o valor a ser inserido no software a fim de realizar a avaliação de risco. A adoção do maior valor se relaciona à busca por uma condição de pior cenário. Durante a etapa de identificação pelo software dos parâmetros analisados foi constatado que valores de referência para chumbo, fenol total e cromo total não constavam na base toxicológica utilizada. Quanto à presença de alguns compostos analisados, foram feitas algumas considerações. Como situação de contorno em relação ao fenol total quantificado, o software não dispõe em sua base de dados informações relativas a fenol total, apenas para fenol e outros compostos fenólicos separadamente. Desta forma, verificou-se junto ao fabricante das resinas fenólicas empregadas no processo de fundição da empresa que os compostos fenólicos têm concentração pouco expressiva em relação à concentração de fenol na resina, assim, assumiu-se que o fenol total analisado corresponde ao composto fenol, para efeito de combinação com o parâmetro existente na base toxicológica. Sobre o cromo, foi observado que na base de dados do software havia cromo III e cromo IV, e como não foi possível identificar qual deles possuía concentração mais significativa, foi assumido o uso do cromo IV da base de dados por seu impacto ser mais significativo no âmbito ambiental. Como não foi detectada a presença de chumbo nas amostras acima dos limites de quantificação, para este parâmetro a análise de risco não foi prejudicada visto que no caso de outros parâmetros que também não foram detectados acima do limite de quantificação, cromo, bário, cádmio e fluoretos, e que possuíam referência na base de dados do software, foram inseridos os valores do limite de quantificação, de modo a permitir uma avaliação mais restritiva.

### 3.2.2.1 Equações para cálculos dos riscos e aportes

O risco carcinogênico segundo a USEPA (1989) é expresso pela equação:

$$\text{Risco} = \text{Aporte}_n \cdot \text{SF} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Risco = risco carcinogênico (adimensional)

Aporte = dose de aporte para o cenário de exposição “n” (mg/kg.dia)

n = cenário escolhido para análise – industrial ou residencial

SF = (1/mg/kg.dia) – fator de carcinogenicidade que define a relação entre dose e a resposta carcinogênica de cada composto

O risco não carcinogênico é avaliado por meio da comparação de um nível de exposição por período de tempo (dose de aporte) com uma dose de referência para um período de exposição similar, conforme a equação a seguir.

$$HQ = \frac{In}{RfDi} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

HQ = quociente de perigo não carcinogênico (adimensional)

In = dose de aporte para o cenário de exposição “n” (mg/kg.dia)

RfDi = dose de referência para a via de ingresso “i” (mg/kg.dia)

O HQ assume que existe um nível de exposição (RfD) abaixo do qual provavelmente não ocorrem efeitos adversos a saúde de populações ou indivíduos expostos a uma concentração de um composto químico de interesse para a avaliação de risco (CETESB, 2009). Se o nível de exposição quantificado para o cenário de exposição (dose de aporte) supera a RfD, ou seja, a relação In/RfDi é maior que 1, existe perigo de ocorrência de efeitos não carcinogênicos diversos e deletérios à saúde humana, pois neste caso a dose de aporte é superior à dose de referência de aporte máximo considerada como limite seguro de absorção.

### 3.2.2.2 Determinação do aporte do contaminante

O aporte para cada via de contaminação considerada requer o uso de uma série de variáveis e fatores de conversão tais como concentração de contaminante na água, fatores de volatilização, solubilização, taxas de inalação, ingestão, contato, frequência de exposição, peso corporal, tempo médio de exposição. As formulações dos aportes utilizados seguiram a metodologia e valores típicos adotados pelo USEPA já incluída no software utilizado para realização dos cálculos, sendo que a soma do risco para cada elemento analisado dentro da amostra corresponde ao risco total da mesma.

Para validar o uso do software e verificar se os cálculos executados e os riscos resultantes estavam corretos, os mesmos foram comparados com os valores encontrados através das estimativas feitas manualmente inserindo os valores das concentrações obtidas em três amostras do conjunto escolhidas aleatoriamente seguindo a mesma metodologia da USEPA (1989), com uso dos mesmos valores da base de dados do software. A análise comparativa revelou que os resultados foram idênticos, validando assim o seu mecanismo na atividade de avaliação de risco à saúde humana para as condições consideradas.

### 3.2.3 Avaliação do Risco Ecológico

A avaliação de risco ecológico, de acordo com a metodologia USEPA é caracterizada por três etapas:

- Formulação do problema - onde há a determinação preliminar dos riscos a serem analisados pela periculosidade dos agentes envolvidos tais como contaminantes de solo e água utilizando marcos de referência;
- Análise - onde ocorre a determinação da exposição para doses de referência e a determinação dos efeitos ecológicos no cenário de referência;
- Caracterização do risco total.

Desta forma, como o objeto deste estudo não é restringir a análise a um único cenário específico onde as ADF possam estar dispostas, neste estudo foi realizada a avaliação do risco no que tange a determinação da fase de formulação do problema a fim de indicar quais parâmetros devem ser considerados e a necessidade de execução das etapas posteriores.

Nesta avaliação a periculosidade dos agentes envolvidos foi determinada através da comparação dos resultados da caracterização do ciclo de vida das ADF com marcos de referência de legislações (conforme o Quadro 2). Com o conjunto comparativo selecionado e os valores amostrais inseridos, a combinação dos parâmetros (substâncias químicas) da amostra com os disponíveis no banco de dados foi feita indicando o percentual dos resultados que superaram os valores de referência. Foram usados os padrões para solo e água subterrânea do EPA (região 06), os padrões de intervenção da Resolução nº 420 (CONAMA, 2009).

Para a avaliação foram selecionados os meios envolvidos solo e água subterrânea considerando a situação eventual encontrada de disposição das ADF.

Quadro 2 Valores de marcos de referência utilizados na avaliação do risco ecológico

| Parâmetro   | Valores de Referência |                                 |                      |                                   |
|-------------|-----------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
|             | EPA (região 6)        |                                 | CONAMA (420/2009)    |                                   |
|             | Massa bruta (mg/kg)   | Lixiviado e Solubilizado (mg/L) | Massa bruta *(mg/kg) | Lixiviado e Solubilizado **(mg/L) |
| Alumínio    | ND                    | 0,087                           | ND                   | 3,5                               |
| Bário       | 1,04                  | 0,004                           | 500                  | 0,7                               |
| Cádmio      | 0,00222               | 0,0006                          | 8                    | 0,005                             |
| Chumbo      | 0,0537                | 0,001                           | 300                  | 0,01                              |
| Cromo total | 0,4                   | 0,1008                          | 300                  | 0,05                              |
| Fenol total | 120                   | 0,11                            | 10                   | 0,14                              |
| Ferro       | ND                    | 1                               | ND                   | 2,45                              |
| Fluoretos   | ND                    | ND                              | ND                   | ND                                |
| Manganês    | ND                    | 0,12                            | ND                   | 0,4                               |

Legenda: ND – Valor não disponível na base de dados do marco de referência. \* Valores orientadores de investigação para solos, \*\* Valores orientadores para investigação de água subterrânea.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1 Inventário de Caracterização do Ciclo de Vida da ADF

Como resultado da primeira etapa deste estudo obteve-se o fluxograma de caracterização do ciclo de vida da ADF, conforme **Figura 6** (em detalhe no Anexo 1). Desta forma constituiu-se o inventário que contemplou a caracterização do ciclo de vida de todas as ADF, incluindo desde as suas matérias primas até a etapa de descarte para a avaliação do risco dos impactos ambientais decorrentes do perigo potencial para a eventual disposição no solo, sendo:

Matérias primas (MP) que compõe as ADF:

- Areia base;
- Pó de carvão aditivado;
- Bentonita sódica ativada;
- Bentonita sódica natural;

- Mistura em partes iguais de bentonita sódica ativada e bentonita sódica natural;
- Pó de carvão.

Amostras coletadas de etapas intermediárias que retornam ao processo produtivo (PR) para uso:

- Areia da desmoldagem;
- Areia regenerada de macharia; Areia recuperada moldagem;
- Areia à verde (sistema);
- Areia de macharia.

Resíduos coletados na etapa de descarte (RS):

- Resíduo de areia de macharia;
- Resíduo de areia de moldagem;
- Pó da exaustão da moldagem;
- Resíduo de quebra de canal.

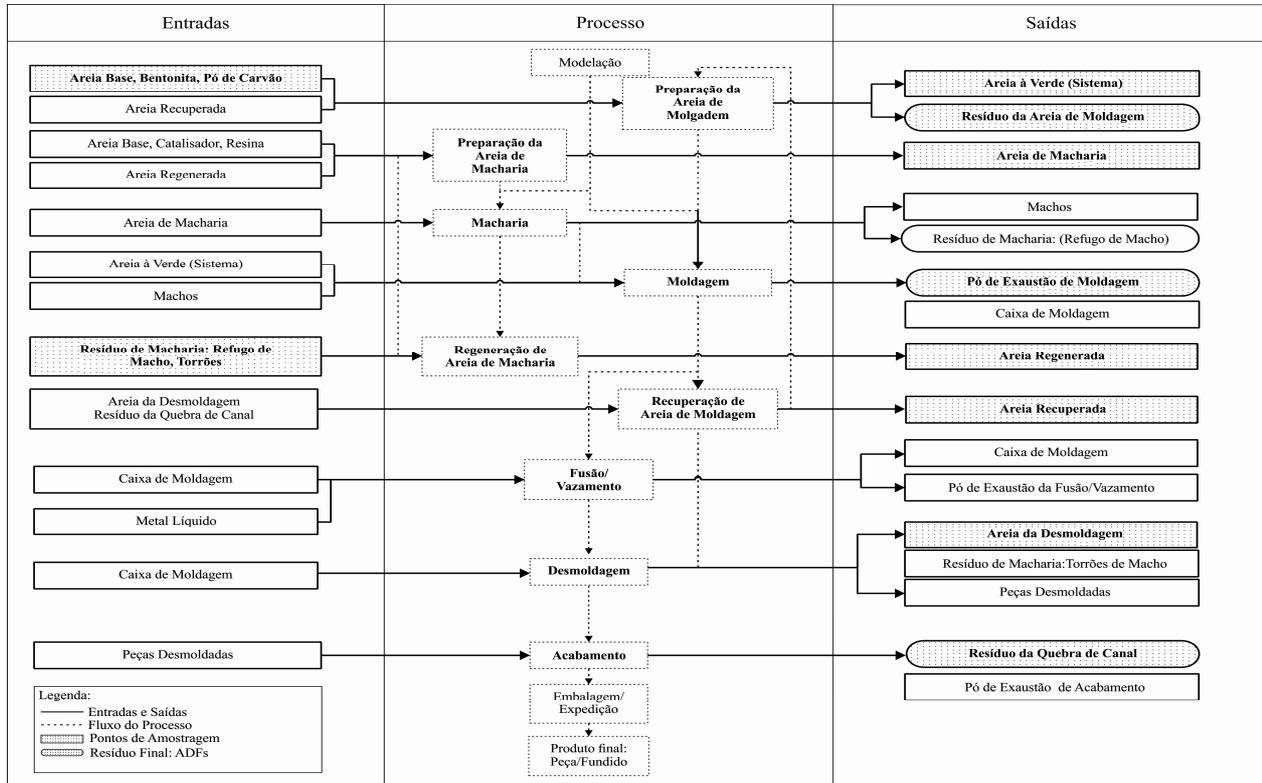


Figura 6. Fluxograma de caracterização do ciclo de vida das ADF

### 3.3.2 Resultados da Avaliação do Risco à Saúde Humana

A Tabela 14 e a Tabela 15 apresentam os resultados obtidos que permitem analisar a variação do risco à saúde humana, tanto carcinogênico quanto não carcinogênico, ao longo da cadeia de geração das ADF do processo produtivo. A soma do risco para cada elemento analisado dentro da amostra corresponde ao risco total da mesma (Anexo 1).

Tabela 14 Determinação do risco carcinogênico considerando cenário residencial de exposição

| Amostra |                                    | Risco Total Carcinogênico | Limite |
|---------|------------------------------------|---------------------------|--------|
|         |                                    | Massa Bruta               |        |
| MP      | Areia Base                         | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| MP      | Pó de Carvão Aditivado             | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| MP      | Bentonita Ativada                  | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| MP      | Bentonita Sódica Natural           | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| MP      | Bentonita Sódica Ativada + Natural | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| MP      | Pó de Carvão                       | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| PR      | Areia de Regeneração da Macharia   | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| PR      | Mistura de Areia da Macharia       | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| PR      | Areia do Sistema de Moldagem       | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| PR      | Areia de Regeneração de Moldagem   | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| PR      | Areia Desmoldagem                  | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| RS      | Resíduo de Areia de Macharia       | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| RS      | Resíduo de Areia de Moldagem       | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| RS      | Resíduo de Quebra de Canal         | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |
| RS      | Resíduo Pó de Exaustão             | 2,7E-9                    | 1,0E-5 |

Legenda: MP – Matéria Prima, PR – Processo e RS – Resíduo Sólido

Percebe-se que o risco carcinogênico só é evidenciado na análise de massa bruta, e ainda assim o resultado alcançado, 2,7E-9 (2,7 casos em 1 bilhão de pessoas expostas), está consideravelmente distante

do limite de  $1,0E-5$  (1 caso adicional de câncer em 100 mil pessoas expostas) estabelecido pela CETESB (CETESB,2009). Nas análises de lixiviado e solubilizado o risco carcinogênico não foi evidenciado quando os valores resultantes da sua análise foram inseridos nas fórmulas de cálculo do aporte.

Tabela 15 Determinação do risco não carcinogênico considerando cenário residencial de exposição

| Amostra |                                    | Risco Total Não Carcinogênico |           |              | Limite |
|---------|------------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|--------|
|         |                                    | Massa Bruta                   | Lixiviado | Solubilizado |        |
| MP      | Areia Base                         | 2,4E-3                        | 1,5E-1    | 3,9E-1       | 1,0E+0 |
| MP      | Pó de Carvão Aditivado             | 2,7E-3                        | 1,6E-1    | 2,5E+0       | 1,0E+0 |
| MP      | Bentonita Ativada                  | 8,0E-3                        | 3,9E-1    | 5,7E-1       | 1,0E+0 |
| MP      | Bentonita Sódica Natural           | 7,5E-3                        | 6,2E-1    | 5,5E-1       | 1,0E+0 |
| MP      | Bentonita Sódica Ativada + Natural | 2,0E-2                        | 4,4E-1    | 5,9E-1       | 1,0E+0 |
| MP      | Pó de Carvão                       | 3,0E-3                        | 6,4E-1    | 5,0E-1       | 1,0E+0 |
| PR      | Areia de Regeneração da Macharia   | 3,5E-3                        | 1,1E+0    | 5,4E-1       | 1,0E+0 |
| PR      | Mistura de Areia da Macharia       | 2,3E-3                        | 8,8E-1    | 7,7E-1       | 1,0E+0 |
| PR      | Areia do Sistema de Moldagem       | 8,2E-3                        | 2,6E-1    | 5,7E+0       | 1,0E+0 |
| PR      | Areia de Regeneração de Moldagem   | 6,5E-3                        | 3,2E-1    | 8,7E-1       | 1,0E+0 |
| PR      | Areia Desmoldagem                  | 6,5E-3                        | 2,7E-1    | 4,0E+0       | 1,0E+0 |
| RS      | Resíduo de Areia de Macharia       | 3,2E-3                        | 2,8E-1    | 5,0E-1       | 1,0E+0 |
| RS      | Resíduo de Areia de Moldagem       | 1,1E-2                        | 2,7E-1    | 5,6E+0       | 1,0E+0 |
| RS      | Resíduo de Quebra de Canal         | 8,9E-3                        | 4,8E-1    | 7,8E-1       | 1,0E+0 |
| RS      | Resíduo Pó de Exaustão             | 1,3E-2                        | 1,5E+0    | 1,4E+0       | 1,0E+0 |

Legenda: MP – Matéria Prima, PR – Processo e RS – Resíduo Sólido

Em relação ao risco não carcinogênico, no ensaio de massa bruta, o maior valor de risco à saúde humana (2,0E-2), foi apontado na análise de uma matéria prima, a bentonita ativada misturada em parte igual com a bentonita sódica natural. Algumas matérias primas e pontos ao longo do processo possuem resultados na avaliação de risco que superam algumas vezes os resíduos analisados, o que pode caracterizar em certos casos que as próprias matérias primas naturalmente já apresentam concentrações mais elevadas de contaminantes. Outra atribuição ao valor elevado de risco não carcinogênico da amostra contendo mistura de bentonitas pode estar relacionado a erro laboratorial, visto que o resultado das análises das bentonitas avaliadas individualmente é inferior ao da mistura de bentonitas (Anexo 1).

Nas amostras de processo o aumento do risco é provocado pela etapa de fusão propriamente dita, nas amostras de areia do sistema de moldagem, areia da regeneração da moldagem e areia da desmoldagem, pois nesta fase existe o vazamento do metal líquido que confere adição de metais nas amostras coletadas e analisadas. A separação do metal fundido das areias utilizadas no processo é feita por peneiramento, vibração e separação magnética que não impedem a presença de pequenas partículas metálicas quando estas areias retornam ao sistema. Nas amostras de areia de regeneração da macharia e mistura da areia de macharia o aumento do risco é provocado pela entrada de resinas fenólicas na sua preparação com valores superiores apontados nos resultados da lixiviação e solubilização.

Já nas amostras de resíduos que são descartadas após o processo houve uma redução do risco do resíduo de areia da macharia provocado pela volatilização de gases durante o processo de vazamento de metal líquido e durante a desmoldagem. Enquanto que o resíduo de areia de moldagem na massa bruta teve um aumento provocado pela adição de matérias primas para sua substituição no sistema de moldagem e pela sua exposição aos metais durante o processo de vazamento, no entanto mantendo os mesmos níveis das matérias primas e processos para os valores de lixiviação e solubilização. Os resíduos da etapa de quebra de canal tiveram uma pequena redução do risco em função do processo de despoeiramento e remoção de resíduos metálicos por eletroímãs provocados pelo processo de fusão de metais. No caso do resíduo de pó da exaustão o risco foi maior porque esta etapa tem a função de coletar a parte do material fino excedente do processo de moldagem e desmoldagem e pela volatilização de gases que são arrastados pelo sistema causando incidência, embora que abaixo do limite de referência (1,0E+0), de fenol.

Os valores de risco não carcinogênico encontrados (Tabela 15) acima do padrão referência estão diretamente relacionados aos padrões de consumo para água potável, como ferro, alumínio e manganês levando em conta a avaliação sob o cenário residencial.

Considerando a hipótese de uma área cujo solo apresenta as mesmas concentrações para os compostos analisados e sob o cenário residencial de exposição, mais restritivo que o industrial de mais comum uso, a mesma não ofereceria riscos significativos à saúde humana, tanto em relação aos efeitos carcinogênicos quanto aos não carcinogênicos.

Para realizar um trabalho de estimativa do risco à saúde humana são assumidas condições e considerações, que por sua vez culminam em incertezas. Embora a avaliação de risco tenha considerado um número limitado de parâmetros, e alguns dos parâmetros analisados não se encontravam nas bases de dados do software utilizado, assumiu-se em uma abordagem conservadora, com a avaliação de alguns parâmetros associando-os ao respectivo limite de quantificação (Quadro 1) onde os resultados das análises ficaram abaixo desse valor (Anexo 1).

Também deve ser considerado que foram utilizados os dados de concentração de parâmetros presentes no resíduo em si. Isto reflete uma condição mais restritiva em relação a uma amostra de solo que contivesse o resíduo de areia de moldagem, na qual haveria uma indeterminação sobre qual a influência do resíduo propriamente dito no resultado final, visto que essa mistura poderia causar redução ou aumento de contaminantes dependendo das características geoquímicas do solo.

As incertezas no trabalho de avaliação passam ainda pela consideração de apenas um cenário de exposição (residencial) e a adoção dos valores provenientes das bases de dados do software utilizado, que não representam em sua totalidade valores idênticos àqueles que a CETESB utiliza, por exemplo, mas que são em sua maioria muito próximos.

Esse comparativo foi feito utilizando os valores adotados pela CETESB em sua planilha de avaliação de risco para áreas contaminadas sob investigação onde o risco carcinogênico encontrado para a ADF oriunda do processo de moldagem foi de  $9,1E-12$  e o não carcinogênico  $2,8E-3$ . Assim, o risco ficou também abaixo dos valores de referência ( $1,0E-5$  para o carcinogênico e  $1,0E+1$  para o não carcinogênico), apresentando resultados semelhantes.

### 3.3.3 Resultados da Avaliação do Risco Ecológico

Neste estudo o risco ecológico consistiu em determinar se os valores obtidos das análises de massa bruta, lixiviação e solubilização da amostras do ciclo de vida da ADF (Anexo1) ultrapassaram os valores de referência (Quadro 2) podendo indicar desta forma uma possível contaminação de solo ou água para uma fase posterior de disposição.

Com o conjunto comparativo selecionado e os valores amostrais inseridos, a combinação dos parâmetros da amostra com os disponíveis no banco de dados foi feita indicando o percentual dos resultados da amostras que superaram os valores de referência (Anexo 1). Foram usados os padrões para solo e água subterrânea do EPA (região 06), os padrões de intervenção da Resolução nº 420 (CONAMA, 2009).

Para a avaliação foram selecionados os meios envolvidos solo e água subterrânea considerando a situação eventual encontrada de disposição das ADF.

A Tabela 16 e a Tabela 17 apresentam os resultados da análise de risco ecológico realizado nas matérias primas, amostras do processo e resíduos, respectivamente, sendo que a legenda pode ser lida da seguinte maneira:

- ND – Não Disponível: representa valores não disponíveis nos padrões de comparativos e não são considerados como fator de risco nas referências utilizadas.
- NV – Não Verificado: representa que o risco não identificado devido ao limite de quantificação das amostras analisadas ser igual ou superior ao dos padrões comparativos.
- SR – Sem Risco: representa as amostras onde os valores obtidos ficaram abaixo dos valores dos padrões comparativos de referência.
- AR – Apresentou Risco: representa as amostras onde os valores obtidos ficaram acima dos valores dos padrões comparativos de referência.

Tabela 16 Determinação do risco ecológico do ciclo de vida da ADF utilizando marcos de referência do EPA

| Amostra |                                    | Risco Total Ecológico - EPA % |      |      |      |
|---------|------------------------------------|-------------------------------|------|------|------|
|         |                                    | ND                            | NV   | SR   | AR   |
| MP      | Areia Base                         | 22,2                          | 44,4 | 33,3 | 0,0  |
| MP      | Pó de Carvão Aditivado             | 22,2                          | 44,4 | 25,9 | 7,4  |
| MP      | Bentonita Sódica Ativada           | 22,2                          | 44,4 | 29,6 | 3,7  |
| MP      | Bentonita Sódica Natural           | 22,2                          | 37,0 | 25,9 | 14,8 |
| MP      | Bentonita Sódica Ativada + Natural | 22,2                          | 40,7 | 29,6 | 7,4  |
| MP      | Pó de Carvão                       | 22,2                          | 44,4 | 29,6 | 3,7  |
| PR      | Areia de Regeneração da Macharia   | 22,2                          | 44,4 | 22,2 | 11,1 |
| PR      | Mistura de Areia da Macharia       | 22,2                          | 44,4 | 25,9 | 7,4  |
| PR      | Areia do Sistema de Moldagem       | 22,2                          | 40,7 | 29,6 | 7,4  |
| PR      | Areia de Regeneração de Moldagem   | 22,2                          | 40,7 | 25,9 | 11,1 |
| PR      | Areia Desmoldagem                  | 22,2                          | 25,9 | 25,9 | 25,9 |
| RS      | Resíduo de Areia de Macharia       | 22,2                          | 40,7 | 33,3 | 3,7  |
| RS      | Resíduo de Areia de Moldagem       | 22,2                          | 40,7 | 22,2 | 14,8 |
| RS      | Resíduo de Quebra de Canal         | 22,2                          | 44,4 | 25,9 | 7,4  |
| RS      | Resíduo Pó de Exaustão             | 22,2                          | 40,7 | 14,8 | 22,2 |

Legenda: MP – Matéria Prima, PR – Processo e RS – Resíduo Sólido/  
 ND – Não Disponível, NV – Não Verificado, SR – Sem Risco e AR – Apresentou Risco

Tabela 17 Determinação do risco ecológico do ciclo de vida da ADF utilizando marcos de referência do CONAMA

| Amostra |                                    | Risco Total Ecológico - CONAMA % |      |      |     |
|---------|------------------------------------|----------------------------------|------|------|-----|
|         |                                    | ND                               | NV   | SR   | AR  |
| MP      | Areia Base                         | 22,2                             | 3,70 | 74,1 | 0,0 |
| MP      | Pó de Carvão Aditivado             | 22,2                             | 3,70 | 66,7 | 7,4 |
| MP      | Bentonita Sódica Ativada           | 22,2                             | 3,70 | 74,1 | 0,0 |
| MP      | Bentonita Sódica Natural           | 22,2                             | 3,70 | 74,1 | 0,0 |
| MP      | Bentonita Sódica Ativada + Natural | 22,2                             | 3,70 | 74,1 | 0,0 |
| MP      | Pó de Carvão                       | 22,2                             | 3,70 | 74,1 | 0,0 |
| PR      | Areia de Regeneração da Macharia   | 22,2                             | 3,70 | 66,7 | 7,4 |
| PR      | Mistura de Areia da Macharia       | 22,2                             | 3,70 | 66,7 | 7,4 |
| PR      | Areia do Sistema de Moldagem       | 22,2                             | 3,70 | 66,7 | 7,4 |
| PR      | Areia de Regeneração de Moldagem   | 22,2                             | 3,70 | 66,7 | 7,4 |
| PR      | Areia Desmoldagem                  | 22,2                             | 3,70 | 66,7 | 7,4 |
| RS      | Resíduo de Areia de Macharia       | 22,2                             | 3,70 | 74,1 | 0,0 |
| RS      | Resíduo de Areia de Moldagem       | 22,2                             | 3,70 | 66,7 | 7,4 |
| RS      | Resíduo de Quebra de Canal         | 22,2                             | 3,70 | 74,1 | 0,0 |
| RS      | Resíduo Pó de Exaustão             | 22,2                             | 3,70 | 66,7 | 3,7 |

Legenda: MP – Matéria Prima, PR – Processo e RS – Resíduo Sólido  
 ND – Não Disponível, NV – Não Verificado, SR – Sem Risco e AR – Apresentou Risco.

A Tabela 16 e Tabela 17 demonstram que tanto as matérias primas quanto amostras de processo e resíduos apresentaram percentuais de amostras com risco (AR) acima dos valores de referência utilizados (Quadro 2). No Anexo 1 encontra-se o detalhamento dos parâmetros que de cada análise que ultrapassou o valor de referência.

Neste estudo o EPA região 6 foi utilizado como sendo uma das bases comparativas internacionais que apresentaram mais parâmetros próximos dos analisados para ADF. Neste padrão, os valores são relacionados com as condições ambientais deste país tais como tipo de

vegetação, fauna e características químicas de água e solo. Já o padrão da Resolução CONAMA nº 420 é relacionado aos padrões de investigação e intervenção já praticados pela CETESB que procura refletir condições ambientais brasileiras. Os valores do CONAMA consideram também padrões de potabilidade para o consumo humano.

Nas amostras que apresentaram risco foi identificado que os parâmetros com maior incidência foram alumínio, ferro e manganês (Anexo 1). Estes são os elementos que freqüentemente classificam a ADF como resíduos classe II-A e que, em geral, não conferem periculosidade as amostras diante da classificação prevista pela NBR 10.004. Tal fato é demonstrado pelo fator de que estes elementos não são disponíveis (ND) dentro de ambas as bases por não serem considerados como fator de risco para solo em amostras sólidas ou na massa bruta (Quadro 2). Já na investigação de águas subterrâneas ou superficiais esses elementos devem ser acompanhados porque conferem características organolépticas em desacordo para o consumo humano de água potável.

Nas amostras onde o risco foi identificado como NV (não verificado) os padrões disponíveis na base de dados demonstraram se inferiores aos limites de quantificação do método. Nas amostras onde resultados ficaram abaixo do limite de quantificação não é possível afirmar se existe ou não o risco para esses elementos. Desta forma, estudos mais aprofundados podem ser realizados utilizando-se menores limites de quantificação nos ensaios.

Quanto às amostras de processo os resultados de análise de risco revelaram que as amostras relacionadas à atividade de macharia apresentaram o fenol como fator de risco. Esse fato era esperado porque nestas amostras é encontrada maior concentração deste composto nesta etapa do processo de fundição.

Quanto aos resultados das amostras de resíduos, foi apontado risco na amostra de pó da exaustão devido ao fenol proveniente dos gases volatilizados do processo e que são arrastados pelo sistema de coleta de material particulado. As demais amostras apresentaram as mesmas características de risco que as matérias primas apresentaram para os parâmetros ferro, alumínio e manganês, apesar da magnitude da concentração dos resultados encontrados nos elementos analisados apresentarem-se superiores.

De modo geral, é possível dizer que as matérias primas apresentaram menor percentual de risco quando comparado às amostras de processo e aos resíduos em relação à concentração obtida dos ensaios de massa bruta, solubilizado e lixiviação. Desta forma, nota-se o incremento da concentração dos parâmetros que conferiram risco para as amostras de processo que tinham a influencia da atividade de fusão de ferro e pela recirculação de areias pelo sistema. Além disso, este fato também está demonstrado no resíduo final. Também se pode dizer que as amostras apresentaram menor risco quando comparadas pela Resolução CONAMA do que com o padrão da USEPA região 06.

### **3.4 CONCLUSÃO**

Este estudo demonstrou que as maiores quantidades de amostras não apresentaram risco diante dos valores de referência estabelecidos de acordo com as bases e padrões utilizados. O uso da concentração dos principais constituintes das ADF por meio de ensaios de massa bruta, lixiviação e solubilização foram úteis para relacionar os potenciais riscos à saúde e ao meio ambiente desde a matéria prima até o produto final.

Na avaliação do risco à saúde humana o risco carcinogênico foi o mesmo desde as matérias primas até o resíduo final. O risco não carcinogênico para o resíduos de ADF foram superiores às matérias primas para os resultados dos valores obtidos dos ensaios de massa bruta, lixiviado e solubilização. Para as condições consideradas, o resíduo areia de moldagem, principal ADF gerada pelo processo de fundição em termos de volume, não ofereceu risco à saúde humana, tanto em relação a efeitos carcinogênicos quanto a não carcinogênicos, em um nível que pudesse exigir o uso de métodos de minimização da exposição em função dos contaminantes encontrados: ferro, alumínio e manganês, também presentes nas matérias primas.

O resultado da avaliação de risco ecológico mostrou que os valores risco crescem ao longo do processo de geração de ADF e que decaem na etapa de descarte dos resíduos. E, assim como na avaliação de risco à saúde humana os elementos que apresentaram risco estão relacionados ao controle da qualidade organoléptica para o consumo de água.

Estudos adicionais podem ser realizados visando utilizar menores valores para o limite de quantificação dos métodos utilizados para os elementos onde o risco não foi verificado. Estudos mais

abrangentes, considerando outros cenários de exposição ou para um tempo de exposição maior ou menor, por exemplo, podem ser realizados para a diminuição das incertezas relativas à avaliação de risco.

## **CAPÍTULO 4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS E AMBIENTAIS DA BENTONITA COMO MATERIAL IMPERMEABILIZANTE EM AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO**

Remete à etapa dos procedimentos experimentais que partiu da avaliação dos riscos à saúde humana e ecológico do ciclo de vida da ADF e que indicou que a caracterização das propriedades de matérias primas pode auxiliar na definição de parâmetros de controle, como as características de comportamento impermeabilizante de ADF nas atividades de reutilização e disposição.

### **4.1 RESUMO**

Este capítulo descreve o trabalho de caracterização de amostras ADF com diferentes teores de bentonita. O objetivo foi caracterizar as propriedades geotécnicas e químicas ambientais de areias descartadas de fundição em misturas com diferentes teores de bentonita visando identificar a contribuição desta argila como material impermeabilizante nos trabalhos de valorização e estudos de compreensão dos impactos ambientais da disposição deste resíduo. Foram analisadas 10 amostras, sendo nove sintéticas e uma amostra coletada diretamente do processo produtivo, cujos teores de bentonita sódica natural e bentonita sódica ativada variavam entre 4% e 15%. Para a caracterização foram realizados ensaios de granulometria, curva de compactação, umidade, limites de Atterberg, fluorescência e difração de raios X, massa bruta e lixiviação. Os resultados apontam que as propriedades geotécnicas e químicas das amostras de areia descartadas de fundição são influenciadas pela ação bentonita com material capaz de proporcionar ação impermeabilizante por meio do uso adequado das suas propriedades de compactação.

Palavras chave: Areia descartada de fundição, bentonita, impermeabilizante, impacto ambiental, disposição.

## 4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.2.1 Definição das Amostras

Para obter resíduos de ADF com diferentes teores de bentonita, buscou-se na literatura do processo de fundição os teores de argila usualmente utilizados na composição da areia de moldagem. O resíduo da areia de moldagem foi escolhido para este estudo como sendo o de maior volume de geração dentro do ciclo de vida das ADF. A faixa de concentração utilizada no processo apontada pela AFS (1996) foi encontrada variando de 4% a 15% de argila em massa sobre a quantidade de areia virgem, sendo a bentonita sódica natural e a bentonita sódica ativada as mais utilizadas pela indústria de fundição.

Com auxílio do software estatístico Minitab® para estabelecer valores que fossem viáveis para o estudo foram estabelecidas todas as combinações possíveis variando os teores de bentonita sódica ativada e bentonita sódica natural de acordo com os valores de entrada, como segue no Quadro 3. Os teores de areia virgem (200kg) e pó de carvão (2,6% sobre a quantidade de areia) foram mantidos fixos na mistura de areia de moldagem.

Quadro 3 Planejamento experimental – valores altos, intermediários e baixos das variáveis

| <b>Fatores</b>             | <b>Baixo (%)</b> | <b>Intermediário (%)</b> | <b>Alto (%)</b> |
|----------------------------|------------------|--------------------------|-----------------|
| Bentonita Sódica - Natural | 4                | 8                        | 15              |
| Bentonita Sódica - Ativada | 4                | 8                        | 15              |

Fonte: primária – do autor

Após gerar as combinações, algumas delas foram excluídas por estarem acima ou abaixo dos limites recomendados na literatura. O Quadro 4 apresenta as combinações tecnicamente viáveis para a realização dos testes de moldagem para obtenção das amostras sintéticas. Uma amostra (R10) foi coletada diretamente do processo de uma empresa de fundição a fim de se estabelecer um comparativo com a amostra real de sistema e as amostras sintéticas do estudo.

Quadro 4 Combinações viáveis tecnicamente para realização dos testes de moldagem

| <b>Amostra</b> | <b>% Bentonita</b>            | <b>Total % de Bentonita</b> |
|----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| R1             | 8 (natural)                   | 8                           |
| R2             | 15 (natural)                  | 15                          |
| R3             | 4 (natural)                   | 4                           |
| R4             | 4(ativada)                    | 4                           |
| R5             | 8(ativada)                    | 8                           |
| R6             | 15 (ativada)                  | 15                          |
| R7             | 4(ativada) +4 (natural)       | 8                           |
| R8             | 4 (ativada) +8(natural)       | 12                          |
| R9             | 8(ativada) +4(natural)        | 12                          |
| R10            | 3,25 (ativada) +3,25(natural) | 6,50                        |

Com o objetivo de obter amostras que se aproximassem ao máximo do resíduo descartado, as composições de areia de moldagem foram encaminhadas à escola de fundição SOCIESC para serem utilizadas no processo em escala piloto, de maneira que a areia passasse por todas as atividades envolvidas e se tornasse um resíduo para o estudo. Após a etapa de desmoldagem o resíduo foi coletado e armazenado em tambor metálico.

#### 4.2.2 Caracterizações das Amostras

Considerando que a geração de resíduos é homogênea foi possível realizar a coleta instantânea aplicando-se a norma brasileira NBR 10007 (ABNT, 2004e) para a realização dos ensaios das variáveis para caracterização da bentonita como agente impermeabilizante (umidade, análise granulométrica, densidade absoluta ou massa específica, limites de Atterberg, compactação, fluorescência de raios X, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, lixiviação e massa bruta). O ensaio de lixiviação foi escolhido por ser considerado pela NBR 10005 como o ensaio que tem a capacidade de determinar a transferência de substâncias químicas presente em amostras sólidas por meio de dissolução visando diferenciar a periculosidade de resíduos.

As amostras foram levadas ao laboratório Geofoma Engenharia para realização dos ensaios de granulometria, umidade, limites de Atterberg e curva de compactação, seguindo respectivamente o preconizado pelas normas brasileiras, NBR 6457, 6459, 7180, 7181e

7182, respectivamente (ABNT, 1984b); (ABNT, 1984c); (ABNT,1984d); (ABNT,1986a); (ABNT,1986b).

As análises de fluorescência de raios X (FRX) e de difração de raios X (DRX) foram realizadas no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais – LDCM SENAISC/Centro de Tecnologia em Materiais.

A análise química por espectrometria de fluorescência de raios X foi realizada de acordo com o fundamentado na norma NBR 12860 (ABNT, 1993) Neste ensaio, depois de homogeneizadas e quarteadas para retirada de uma alíquota para ensaio, as amostras foram moídas até dissolver os possíveis grãos, secas por infravermelho, pesadas juntamente com fundente de tetraborato de lítio em balança analítica; homogeneizadas e fundidas para obtenção das pérolas para fazer a leitura no espectrômetro de fluorescência de raios X (Equipamento utilizado para análise química elementar, através da medição de intensidades do espectro eletromagnético emitido por amostras quando submetidas aos raios X.)

A difração de raios X foi realizada através de difratômetro para identificar os minerais e fases cristalinas medidas através das distâncias interplanares e das intensidades relativas dos picos nos difratogramas. Na difração de raios X a amostra foi seca em temperatura inferior a 60° C para que os argilominerais não perdessem água de sua estrutura sendo posteriormente desagregada e quarteada. Para análise foi utilizado o método do pó onde cerca de aproximadamente 1g do material pulverizado ou desagregado, é depositado em um sulco na lâmina de vidro procurando-se preservar a desorientação das estruturas cristalinas. O equipamento utilizado é um difratômetro, Difratômetro Bruker – D8 com goniômetro theta–theta. A radiação é Ka em tubo de cobre nas condições de 40kV e 30mA. Os minerais identificados, na análise total, apresentaram-se comparados com padrões do banco de dados do equipamento utilizado no ensaio e referenciados sobre o pico mais importante e diagnóstico do mineral.

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada com a finalidade de observar o recobrimento da bentonita sobre os grãos de partículas de areia e pó de carvão, visando identificar a morfologia e a textura de cada amostra. O microscópio utilizado foi de modelo, Zeiss DSM 940-A do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da UDESC.

Boyle e Ham (1990) descreveram que os resíduos de fundição em um aterro não controlado são expostos à percolação que lixívia os constituintes solúveis possibilitando a contaminação do lençol freático.

Neste sentido, a composição química do resíduo, a formação de percolado e sua lixiviação podem identificar o grau de permeabilidade ou a eficácia da compactação, sendo que na avaliação de risco para disposição ou uso de ADF essa composição é tomada como referência do grau de impacto ambiental ou contaminação provocada por uma disposição ou utilização deste material.

Para definir os parâmetros para a análise do lixiviado e da massa bruta de cada amostra foram realizados estudos preliminares sobre as suas características ambientais, tendo em vista os elementos que determinaram a classificação segundo a NBR 10004 com apoio de execução de Florido (2007) e considerando os padrões da Resolução nº 11 do Conselho Estadual de Meio Ambiente de Santa Catarina (CONSEMA, 2008). Os resultados destas análises mostraram que os elementos arsênio, cádmio, chumbo, cianeto, cromo, selênio, mercúrio, vanádio em geral não estão presentes ou apresentam-se abaixo dos limites permitidos ou de quantificação. Dessa forma, os parâmetros que foram avaliados são: alumínio, bário, cádmio, chumbo, cromo, fenóis totais, ferro, manganês e fluoretos. As 10 amostras foram encaminhadas ao laboratório Acquaplant para realização do ensaio de lixiviação e massa bruta, de acordo com o método específico das normas ABNT: NBR 10005, NBR 10004 e Standard Methods 20ª Edição (ABNT, 2004a); (ABNT, 2004b); (ABNT, 2004c) (STANDARD METHODS, 2005a); (STANDARD METHODS, 2005b).

### **4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Apesar das amostras terem sido elaboradas e nomeadas na seqüência da utilização por tipo de bentonita utilizada na mistura da areia de moldagem, os resultados da caracterização foram apontados na seqüência de percentual de bentonita, favorecendo desta forma a discussão conforme aponta o Quadro 5.

Quadro 5 Sequência das amostras utilizadas na discussão dos resultados

| R3                | R4                | R1                | R5                | R7                          | R8                          | R9                          | R2                | R6                | R10                         |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|
| % de Bentonita    |                   |                   |                   |                             |                             |                             |                   |                   |                             |
| 4                 | 4                 | 8                 | 8                 | 8                           | 12                          | 12                          | 15                | 15                | 6,5                         |
| Bentonita Natural | Bentonita Ativada | Bentonita Natural | Bentonita Ativada | Bentonita Ativada e Natural | Bentonita Ativada e Natural | Bentonita Natural e Ativada | Bentonita Natural | Bentonita Ativada | Bentonita Ativada e Natural |

#### 4. 3.1 Caracterização Física

Os resultados da caracterização física dos resíduos de ADF de moldagem podem ser observados na Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20 para as análises de limites de Atterberg, granulometria e compactação. A granulometria é determinante na avaliação das atividades de valorização das ADF, bem como no momento de prever o comportamento desse material em suas aplicações.

Entre as amostras sintéticas, a Tabela 18 mostra que quanto maior o teor de bentonita, maior o teor de finos (material que passa na malha 200). Na amostra real (R10) encontrou-se um teor de finos maior devido a ser uma areia de moldagem que retornou ao sistema para reuso, e que esteve exposta a altíssimas temperaturas (na etapa de vazamento do metal líquido no molde a areia a temperatura chega a torno de 1300 °C), vibrações e atritos, como nas etapas de desmoldagem e preparação de areias nos misturadores.

Tabela 18 Resultados da análise de granulometria

| <b>Amostra</b>         |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| <b>Granulometria</b>   | <b>R3</b> | <b>R4</b> | <b>R1</b> | <b>R5</b> | <b>R7</b> | <b>R8</b> | <b>R9</b> | <b>R2</b> | <b>R6</b> | <b>R10</b> |
| Pedregulho (%)         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          |
| Areia Grossa (%)       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          |
| Areia Média (%)        | 5,97      | 6,69      | 6,15      | 6,68      | 8,54      | 7,23      | 7,93      | 5,10      | 6,44      | 6,61       |
| Areia Fina (%)         | 89,29     | 85,86     | 85,4      | 85,81     | 83,33     | 81,55     | 82,36     | 83,07     | 81,71     | 81,11      |
| Passa na Malha 200 (%) | 4,74      | 7,45      | 8,45      | 7,51      | 8,13      | 11,22     | 9,71      | 11,83     | 11,85     | 12,28      |

Os resultados dispostos na Tabela 19 representam o LL - Limite de Liquidez, LP - Limite de Plasticidade, IP - Índice de Plasticidade (que é a diferença entre o LL e LP). As amostras não líquidas ou não plásticas foram representadas por NL e NP, respectivamente.

Tabela 19 Limites de Atterberg para ADF

| <b>Amostra</b> | <b>R3</b> | <b>R4</b> | <b>R1</b> | <b>R5</b> | <b>R7</b> | <b>R8</b> | <b>R9</b> | <b>R2</b> | <b>R6</b> | <b>R10</b> |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| LL             | 25        | NL        | NL        | NL        | 29        | 35        | 34        | 33        | 44        | 25         |
| LP             | NP        | NP        | NP        | NP        | NP        | 19        | 19        | 20        | 21        | NP         |
| IP             | -         | -         | -         | -         | -         | 16        | 15        | 13        | 23        | -          |

Legenda: LL – Limite de Liquidez, LP – Limite de Plasticidade e IP – Índice de Plasticidade/ NL – Não Líquida, NP- Não Plástica.

Nota-se que as amostras mais compressíveis são aquelas com teor de bentonita maior ou igual à 8%. Analisando os resultados, e interpretando o comportamento dos resíduos conforme os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) para a impermeabilização de um solo entre 7 e 15 % apontados por Ferrari (2005), as amostras de resíduo com 12% e 15% de bentonita (R2, R6, R8 e R9) cumprem este quesito de características de um solo impermeável, observando isoladamente os limites de Atterberg. Neste caso as amostras se tornam mais compressíveis conforme o aumento do teor de bentonita, sendo que uma maior compressibilidade estará relacionada ao tamanho dos poros ou menor índice de vazios na amostra e conseqüente alteração do fluxo de água percolante e da permeabilidade.

Através do ensaio de compactação foi possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado com determinada energia. Esta correlação é demonstrada graficamente, através da curva de compactação (Figura 7) na qual o ponto máximo representa o teor de umidade ótima para uma massa específica seca máxima, que geralmente é utilizado como referência em aplicações de ADF, como em cobertura de aterros sanitários. A compactação é um método de estabilização de solos que se dá por aplicação de alguma forma de energia (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Seu efeito confere ao material um aumento de sua massa específica e uma diminuição do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade. Nas amostras compactadas a massa específica seca aumenta com o aumento no teor de bentonita, com exceção da amostra R03, que teve elevada massa específica seca máxima, com o mínimo de teor de bentonita sódica natural, conforme resultados da Tabela 20. Na curva de compactação com amostras de mesmo teor de argila, as bentonitas sódicas naturais tiveram uma massa específica seca máxima ( $p_{dmáx}$ ) levemente maior do que as bentonitas sódicas ativadas, ou seja, estas possuem uma maior compactabilidade. Avaliando em conjunto os limites de Atterberg com a massa específica e os valores obtidos de umidade ótima as amostras entre 12 e 15 % têm a melhor compactação e visto que os valores de umidade ótima foram inferiores ao limites de plasticidade. Comparando com estudos realizados por Dias et al. (2012) valores menores de umidade ótima refletem uma melhor compactação pois a medida que a umidade aumenta a densidade do solo diminui em função da água ocupar a maioria dos poros. Desta maneira amostras com valores inferiores a 12 % de bentonita apresentaram boa compactação não podendo ser confirmadas se seu desempenho seria melhor que as de maior

percentual de bentonita porque estas amostras foram consideradas como não plásticas pelos limites de Atterberg avaliados.

Tabela 20 Compactação das amostras de ADF

| Curva de Compactação                          | Amostra    |
|---|------------|
|   |            |
| Umidade Ótima (%)                             | <b>R3</b>  |
| $\rho_{dm\acute{a}x}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | <b>R4</b>  |
|   | <b>R1</b>  |
|   | <b>R5</b>  |
|   | <b>R7</b>  |
|   | <b>R8</b>  |
|   | <b>R9</b>  |
|   | <b>R2</b>  |
|   | <b>R6</b>  |
|   | <b>R10</b> |

Legenda:  $\rho_{dm\acute{a}x}$  – massa específica seca máxima

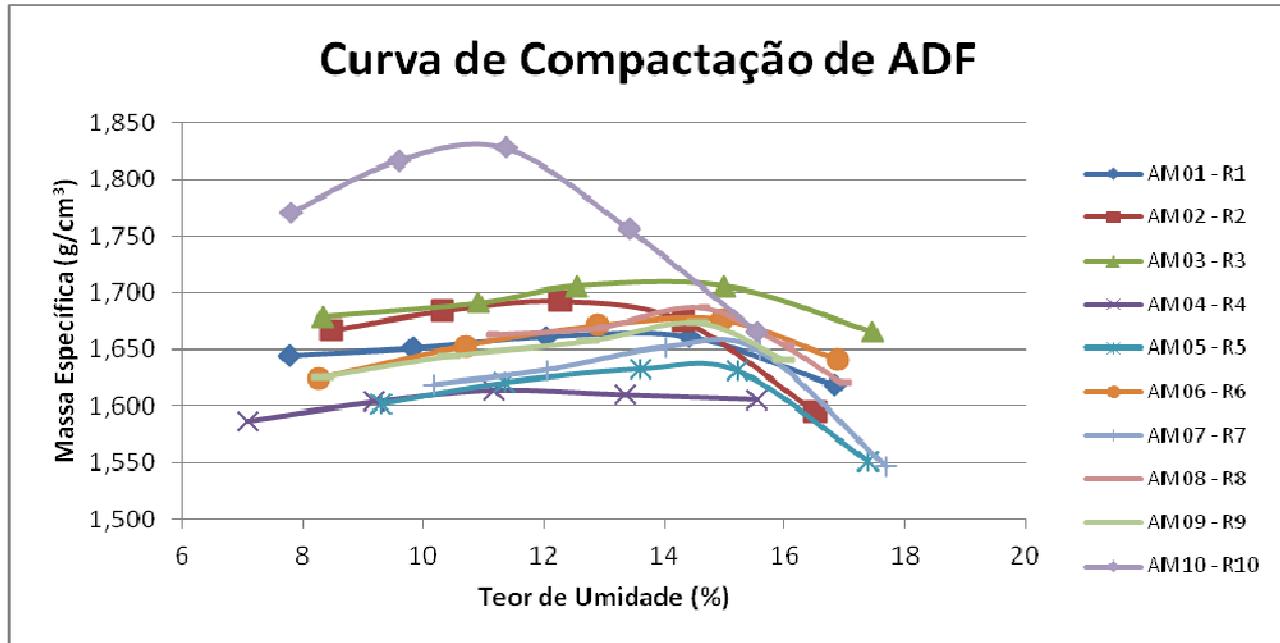


Figura 7 Curva de compactação de ADF com diferentes teores de bentonita

## 4. 3.2 Caracterização Química

### 4.3.2.1 FRX

Nas ADF com argila presente na sua composição, a realização do ensaio de fluorescência de raios X (FRX) torna-se importante devido ao valor variável de umidade que as bentonitas podem apresentar.

Nos valores obtidos para as amostras deste estudo (Tabela 21) verifica-se que a concentração de óxidos de alumínio, ferro, cálcio, magnésio e sódio, aumentam relativamente com o teor de bentonita na amostra devido a serem compostos típicos encontrados nas argilas. Paralelamente, é possível ver o decréscimo de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) na composição das amostras.

A análise da composição química por meio do ensaio de FRX revela que o aumento de óxido de alumínio nas amostras aumenta a refratariedade, enquanto que o aumento de ferro, magnésio, cálcio e sódio a diminuem. Em contrapartida, a redução de sílica na amostra também reduz a refratariedade causando, portanto, o balanceamento da refratariedade das amostras analisadas mostrando que a composição química contribui para suportar altas temperaturas sem prejudicar significativamente outras propriedades físico-químicas, como a plasticidade ou compactação.

Tabela 21 Fluorescência de raios-X de ADF

| Amostras                       | R3    | R4    | R1    | R5    | R7    | R8    | R9    | R2    | R6    | R10   |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Parâmetros                     | %     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,16  | 1,34  | 1,78  | 1,67  | 1,81  | 2,31  | 2,09  | 2,41  | 2,44  | 2,17  |
| BaO                            | N.D.  |
| CaO                            | 0,05  | 0,07  | 0,09  | 0,09  | 0,09  | 0,13  | 0,11  | 0,14  | 0,14  | 0,13  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,3   | 0,5   | 0,5   | 0,7   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,6   | 1,1   | 0,8   |
| K <sub>2</sub> O               | 0,21  | 0,22  | 0,23  | 0,24  | 0,25  | 0,24  | 0,25  | 0,23  | 0,25  | 0,17  |
| MgO                            | 0,15  | 0,18  | 0,24  | 0,21  | 0,23  | 0,32  | 0,29  | 0,36  | 0,35  | 0,29  |
| MnO                            | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,02  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,3   | 0,2   | 0,3   | 0,3   | 0,2   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  |
| SiO <sub>2</sub>               | 94,01 | 94,36 | 94,02 | 93,54 | 93,53 | 92,03 | 93,15 | 91,89 | 91,71 | 91,36 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,18  | 0,22  | 0,19  | 0,21  | 0,19  | 0,21  | 0,2   | 0,21  | 0,26  | 0,31  |

#### 4.3.2.2 DRX

O ensaio de difração de raios-X (DRX) é geralmente utilizado complementarmente ao ensaio químico de FRX quando se tem presente na amostra uma mistura de argilominerais, pois os diferentes grupos de minerais presentes podem apresentar interferentes nos demais métodos utilizados para caracterização de argilas.

No ensaio de DRX a presença de grande número de picos no difratograma facilita a identificação principalmente no caso de misturas. No caso específico das amostras de ADF o ensaio serviu para marcação da presença da bentonita após o processo de fundição, visto que essa fase foi predominante em conjunto com o quartzo determinante pela sílica presente nas amostras.

Assim como no ensaio de FRX, que apresentou tipicamente óxidos de alumínio e ferro, a identificação do mineral associado a bentonita, neste caso a montmorilonita, foi confirmado pelo ensaio da DRX apontado na Tabela 22, confirmando a relevância da bentonita presente nas amostras.

Outras fases que pudessem estar presentes não foram apontadas no ensaio, pois o método não é adequado para estruturas cristalinas muito próximas ou no caso de substâncias amorfas associadas, por exemplo, o pó de carvão utilizado na mistura de areia de moldagem. Isto porque na grande parte dos sólidos os átomos se orientam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X (SANTOS, 1975).

Esse não foi considerado um problema para a análise porque o objetivo principal deste ensaio foi de identificar a presença da bentonita no resíduo de ADF. Neste sentido a bentonita adicionada ao início da mistura permaneceu no resíduo final aumentando de acordo com o percentual adicionado nas formulações realizadas no início do processo.

Tabela 22 Difração de raio-X de ADF

| <b>Amostra</b>        | <b>R3</b>       | <b>R4</b> | <b>R1</b> | <b>R5</b> | <b>R7</b> | <b>R8</b> | <b>R9</b> | <b>R2</b> | <b>R6</b> | <b>R10</b> |
|-----------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Fase Identificada     | % Quantificação |           |           |           |           |           |           |           |           |            |
| <b>Quartzo</b>        | 99,71           | 95,39     | 97,35     | 97,64     | 96,90     | 97,19     | 95,66     | 96,19     | 96,43     | 96,60      |
| <b>Montmorilonita</b> | 0,3             | 4,6       | 2,6       | 2,4       | 3,1       | 2,8       | 4,3       | 3,8       | 3,6       | 3,4        |

#### 4.3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura - MEV

A análise de microscopia eletrônica de varredura (em detalhe no Anexo 2) confirma o recobrimento da bentonita na morfologia das amostras diante pela composição obtida por FRX e DRX nos ensaios realizados com as ADF.

Nas imagens da Figura 8, o elemento alumínio, característico desta argila, foi destacado demonstrando que o recobrimento da bentonita é maior de acordo com o acréscimo na composição de ADF.

Esse melhor recobrimento permite melhores valores de compactação conforme apontado nos ensaios físicos realizados nas amostras.

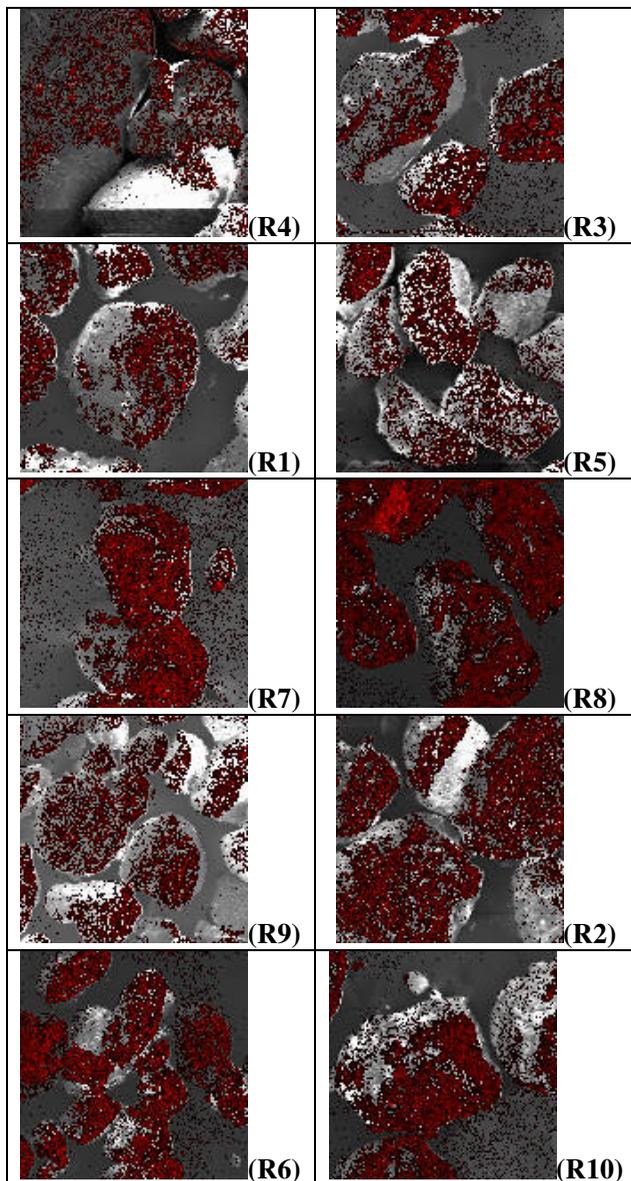


Figura 8 Microscopia eletrônica de varredura de ADFs - destacado mapa do elemento alumínio.

Fonte: primária – do autor.

#### 4. 3.2.4 Análise do Lixiviado e Massa Bruta

Os valores encontrados na massa bruta (Tabela 23) confirmam a atuação da bentonita verificada pelo aumento dos elementos alumínio, ferro, manganês presentes na amostra de acordo com o aumento do percentual da argila.

No caso dos parâmetros fenol e bário essa relação não é confirmada. A presença do composto fenol foi atribuída a matéria orgânica presente nas matérias primas existentes, visto que não foram utilizadas areias quimicamente ligadas com resinas fenólicas durante a preparação das amostras, exceto para a amostra real. A presença de fenol na amostra real não foi precisa porque o local de coleta da amostra do processo é decorrente do excedente do misturador de areias de moldagem, onde a areia que retornou ao processo passou por uma análise e segregação prévia de areias resinadas, metais ou outros interferentes. Também se pode verificar que das amostras sintéticas com teor de bentonita sódica ativada tiveram maiores concentrações desse composto. No entanto, uma relação entre o aumento de bentonita sódica ativada e a concentração de fenol na massa bruta não é confirmada.

A presença de bário em algumas amostras foi identificada de modo irregular. Verificando os métodos empregados observou-se que somente os ensaios para os elementos alumínio e bário utilizam os mesmos procedimentos para o ensaio de metais, o que pode ter influenciado na observação e detecção destes elementos nas amostras analisadas. Esse resultado é confirmado pelo ensaio de FRX onde o bário não foi detectado em nenhuma das amostras. No entanto, é possível verificar que nas amostras com maior teor de bentonita natural a concentração deste elemento foi superior o que pode indicar uma diferença na composição das matérias primas utilizadas. A bentonita sódica ativada passa por um processo de beneficiamento e possui valores de pH maiores, influenciando a sua composição e solubilidade de metais, visto que para o ensaio de massa bruta é realizada a digestão da amostra em pH ácido.

Tabela 23 Valores médios da análise em triplicata de massa bruta de ADF

|  | <b>(mg/kg)<br/>Amostras</b> |           |           |           |           |               |           |           |           |           |            |
|--|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
|  | <b>Al</b>                   | <b>Ba</b> | <b>Cd</b> | <b>Pb</b> | <b>Cr</b> | <b>Fenóis</b> | <b>Fe</b> | <b>Mn</b> | <b>Fl</b> | <b>pH</b> |            |
|  | 499,0                       | <5,00     | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 0,33          | 258       | 3,1       | 1,38      | 6,8       | <b>R3</b>  |
|  | 665,3                       | <5,00     | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 0,81          | 661       | 7,2       | 1,37      | 9,6       | <b>R4</b>  |
|  | 531,7                       | 27,47     | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 0,21          | 505       | 7,1       | 1,38      | 7,6       | <b>R1</b>  |
|  | 620,5                       | <5,00     | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 0,66          | 625       | 9,2       | 1,36      | 9,9       | <b>R5</b>  |
|  | 658,6                       | <5,00     | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 0,89          | 617       | 7,3       | 1,36      | 8,9       | <b>R7</b>  |
|  | 550,2                       | 43,81     | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 0,46          | 442       | 9,6       | 1,38      | 8,5       | <b>R8</b>  |
|  | 506,2                       | 6,14      | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 0,72          | 344       | 11,5      | 1,28      | 9,6       | <b>R9</b>  |
|  | 711,5                       | 80,87     | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 0,72          | 0,11      | 9,0       | 1,31      | 6,9       | <b>R2</b>  |
|  | 1196,0                      | 10,5      | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 0,45          | 1100      | 14,0      | 1,37      | 9,9       | <b>R6</b>  |
|  | 789,4                       | 22,24     | <0,025    | <0,30     | <0,750    | 26,04         | 790       | 14,7      | 1,37      | 8,5       | <b>R10</b> |

Avaliando a lixiviação das amostras de ADF (**Tabela 24**) verificou-se que a alteração do percentual de bentonita nas amostras não afetou significativamente a composição analisada para os mesmos parâmetros da massa bruta. Novamente os resultados obtidos para o parâmetro fenol não se mostraram precisos porque a concentração obtida foi irregular. No entanto, neste ensaio, ao contrário do ensaio da massa bruta, as amostras com bentonita sódica natural apresentaram maiores valores para este composto. Como o pH é mantido estável neste ensaio essa interferência foi desconsiderada, sendo que a diferença não estaria atribuída ao procedimento de coleta, tendo em vista a homogeneidade das amostras. Desta forma como dito anteriormente a própria composição das bentonitas pode explicar essa diferença nos resultados.



#### 4. 4 CONCLUSÃO

A análise realizada das propriedades físicas, químicas e geotécnicas em misturas com diferentes teores mostrou que a bentonita caracteriza-se como material de ação impermeabilizante na composição do resíduo.

Nas amostras analisadas a presença da bentonita representou características geotécnicas que contribuíram para a capacidade da ADF em atuar como material impermeabilizante, em especial quando do ensaio de compactação e pela redução granulométrica dos resíduos, claramente afetada pelo percentual de argila.

A alteração da composição química das amostras em função do percentual de bentonita demonstrado nos ensaios de FRX, DRX, MEV e massa bruta, a lixiviação não alterou significativamente os riscos de impactos ambientais de contaminação de solo e água subterrânea considerando que qualidade do percolado decorrente da disposição de ADF dependerá da sua forma de utilização ou compactação.

Neste caso, devido à forte influência da bentonita no comportamento mecânico do resíduo, caracterizada pelas propriedades físicas, químicas e geotécnicas da ADF, a avaliação da condutividade hidráulica, apresentada no próximo capítulo, poderá servir como característica de avaliação da permeabilidade, visto que ADFs mais compressíveis refletem menor formação de percolado.

## **CAPÍTULO 5 AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM FUNÇÃO DO TEOR DE BENTONITA EM AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO**

Finaliza os procedimentos experimentais adotados com o estudo da relação entre a quantidade de bentonita presente na ADF e a impermeabilização como fator limitante da percolação e contaminação de solo e água subterrânea.

A partir do conhecimento das propriedades físicas, químicas e geotécnicas da ADF, este capítulo apresenta a avaliação da condutividade hidráulica como parâmetro para a determinação da permeabilidade decorrente da compactação diante da influência da bentonita no comportamento mecânico do resíduo verificado no capítulo anterior.

### **5.1 RESUMO**

Este trabalho objetiva avaliar a relação do teor de bentonita com o coeficiente de condutividade hidráulica ( $k$ ) de areias descartadas de fundição (ADF) em ensaios de condutividade hidráulica em um permeâmetro de parede flexível (ASTM, 1997). As amostras ensaiadas possuíam teores de bentonita sódica, natural e ativada, variando entre 4% e 15%. Foi também analisado quimicamente o líquido percolado [alumínio, bário, cromo, cádmio, chumbo, fenóis, ferro, fluoreto e manganês (STANDARD METHODS, 2005a); (STANDARD METHODS, 2005b)]. A campanha experimental foi complementada com a análise de capacidade de troca de cátions e teor de argila ativa. Os resultados obtidos indicaram que o  $k$  está relacionado ao teor de bentonita das ADF com a permeabilidade e com a formação de percolado decorrente da disposição destes resíduos.

Palavras-chave: Areia Descartada de Fundição. Condutividade hidráulica. Análises químicas.

### **5.2 MATERIAL E MÉTODOS**

A composição das ADFs decorrentes do processo de moldagem foi determinada conforme capítulo 4 deste estudo.

### 5.2.1 Ensaios De Condutividade Hidráulica (k)

Os ensaios de laboratório para a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica das amostras R1 a R10 foram realizados em permeâmetros de parede flexível (conforme imagens do Anexo 3). Os ensaios foram realizados com corpos de prova moldados a partir de amostras compactadas, com energia normal, visto que as ADF apresentavam teor de bentonita. Estes ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986b). Os ensaios foram realizados em dois laboratórios distintos. O primeiro ensaio foi executado no Laboratório de Solos da Universidade de São Paulo (USP) e o segundo no Laboratório de Solos do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) devido à necessidade de coleta do percolado para análise em laboratório de maior proximidade à realização do ensaio de condutividade hidráulica.

Para a realização dos ensaios mencionados foram seguidos os procedimentos e recomendações da Norma D5084 (ASTM, 1997). Os procedimentos dos ensaios realizados nos diferentes laboratórios citados foram os mesmos embora as dimensões dos corpos de prova ensaiados tenham sido diferentes. Os corpos de prova foram moldados em formato cilíndrico, contudo, na USP, as dimensões dos mesmos eram de 3 cm de diâmetro e 9 cm de altura. No LACTEC, o diâmetro e a altura dos corpos de prova era 5 cm. Ambos atendendo ao recomendado para as normas acima citadas relativas aos ensaios para limitar as diferenças no resultado final.

Os ensaios de condutividade hidráulica realizados foram tratados como ensaios de modalidade carga constante. A variação no nível de água do reservatório foi desprezada devido à necessidade de um grande volume infiltrado para haver variação significativa em seu nível. O coeficiente de condutividade hidráulica foi calculado utilizando a lei de Darcy para o fluxo de água em solos.

$$k = \frac{Q}{A \cdot i} = \frac{Q}{A \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

k é o coeficiente de condutividade hidráulica (cm/s);

Q é a vazão (cm<sup>3</sup>/s);

A é a área média da seção transversal do corpo de prova (cm<sup>2</sup>) e

i é o gradiente hidráulico (cm/cm).

Os coeficientes de condutividade hidráulica calculados a partir da equação 3 foram corrigidos em função da condutividade hidráulica do sistema no qual o ensaio foi realizado. As correções foram feitas a partir da equação 4 apresentada por Samingan et al. (2003). Também foi realizada a correção dos valores do coeficiente de condutividade hidráulica em função da temperatura da água percolada durante a realização dos ensaios, que era de 23°C (+/-1°C).

$$k_w = \frac{H_s}{\frac{H}{k} - \left( \frac{H_t}{k_t} + \frac{H_b}{k_b} \right)} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$k_w$  é o coeficiente de condutividade hidráulica corrigido (cm/s);  $H_s$  é a altura da amostra (cm);  $H$  é a altura total da amostra mais discos porosos e papel filtro (cm);  $k$  é o coeficiente de condutividade hidráulica medido sem correção (cm/s);  $H_t$  e  $H_b$  são as espessuras das pedras porosas do topo e da base (cm), respectivamente;  $k_t$  e  $k_b$  são os coeficientes de condutividade hidráulica das pedras porosas do topo e da base (cm/s), respectivamente.

Os coeficientes de condutividade hidráulica dos sistemas foram medidos a partir de ensaios específicos realizados com a instalação dos componentes de extremidade do corpo de prova de cada ensaio, no caso dos ensaios no equipamento, pedras porosas e papéis filtro. As pedras porosas utilizadas nos ensaios foram previamente saturadas através de suas imersões em água desairada por um período mínimo de 12 horas. Para a realização do ensaio os componentes de extremidade foram montados na câmara triaxial do permeâmetro e envoltas por membrana de látex e saturadas por contrapressão (aproximadamente 200 kPa) (Anexo 3).

Após os ensaios foram calculados os valores de coeficientes de condutividade hidráulica dos sistemas sendo consideradas as dimensões dos componentes de extremidade dos ensaios.

### 5.2.2 Análise Química dos Percolados das Amostras de ADF

A análise química do percolado, resultante dos ensaios de condutividade hidráulica, foi realizada a fim de verificar a relação entre menores valores de permeabilidade e concentração química do percolado. Os ensaios de laboratório referentes à análise química dos percolados foram executados para este estudo e descritos com apoio de

Gonçalves (2011). As análises foram realizadas no Laboratório Acquaplant Soluções Ambientais. Ao chegarem ao laboratório, as amostras de percolado tiveram o pH medido com um pHmetro digital.

Os parâmetros Al e Ba Cr, Cd, Pb, fenóis, Fe, F e Mn foram selecionados para análise com base em estudos efetuados que contemplaram o ciclo de vida ADF como relevantes para caracterização. Os metais Al, Ba, Cr, Cd, Pb, Fe, Mn foram medidos pelo método de absorção atômica. Os metais, Cr, Cd, Pb, Fe e Mn foram analisados pelo método 3111 B (Método Direto Chama – Ar – Acetileno) (STANDARD METHODS, 2005a). Para os metais Al e Ba utilizou-se o método 3111 D (Método Direto – Chama – Óxido Nitroso – Acetileno) (STANDARD METHODS, 2005b).

A análise de concentração de F<sup>-</sup> foi realizada com o cromatógrafo de íons, que apresenta os valores com base na leitura da altura de pico do analito fluoreto. Os fenóis foram determinados pelo método da colorimetria, com detecção de 0,025 a 5 mg/L. Antes de iniciar a análise colorimétrica, a amostra passou por procedimentos de destilação, a fim de que não houvesse interferência nos resultados.

### **5.2.3 Análise da Capacidade de Troca de Cátions em ADF**

A Capacidade da Troca de Cátions (CTC) foi realizada com objetivo de verificar sua interação com o coeficiente de permeabilidade e a capacidade de retenção de metais nas amostras. A análise da capacidade de troca de cátions em amostras de ADF foi realizada segundo os métodos descritos por Camargo et al. (2009) e realizada pelo Laboratório Bioagri. A determinação de cálcio, magnésio, potássio trocáveis do solo foi realizada através extração dos elementos trocáveis com solução normal de acetato de amônio em pH 7,0 e determinação dos seus teores no extrato em espectrofotômetro de absorção atômica, fotômetro de chama e agitador mecânico.

O pH foi determinado pelo método de CaCl em potenciômetro. A acidez trocável compreende aquela causada pela hidrólise do Al<sup>3+</sup> em solução e pelo íon hidrogênio trocável, neste ensaio o Al<sup>3+</sup> foi determinado por meio de uma solução de sal neutro (KCl 1N), baseado no princípio que em concentrações relativamente altas o potássio desloca principalmente íons alumínio do solo para a solução, os quais se hidrolisam liberando íons hidrogênio que podem ser titulados com uma base. A acidez potencial (representada por H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) revela a acidez total presente entre o nível inicial e final do pH da amostra. Foi empregado o método de extração com acetato de cálcio que tem como

princípio a extração da acidez com solução tamponada e titulação alcalina do extrato.

A soma de bases (SB) foi obtida pela soma dos valores dos cátions trocáveis  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ . A capacidade de troca de cátions (CTC) foi obtida pela soma das bases com a acidez potencial. A saturação das bases (V %) foi calculada pela relação entre a soma de bases e a capacidade de troca de cátions sendo  $V (\%) = (100 \times \text{SB}) / \text{CTC}$ . A determinação dos sólidos em percentual por peso (p/p) (%) foi realizada por gravimetria segundo o método SMWW 2540B (APHA-AWWA-WEF, 1998).

#### **5.2.4 Determinação do Teor de Argila Ativa**

Em fundições uma das formas de se avaliar o grau de inchamento ou adsorção das argilas é o método de determinação do teor de argila ativa fundamentado no procedimento de adsorção do azul de metileno conforme visto na literatura. Esse método está relacionado ao mecanismo de interação do azul de metileno com o argilomineral pela troca catiônica e adsorção. A determinação do teor de argila ativa das amostras foi realizada conforme procedimentos da recomendação CEMP 197 (ABIFA, 2004) no laboratório de análise de areias da empresa Schulz SA. O objetivo deste ensaio foi complementar o ensaio de capacidade de troca de cátions.

### **5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Conforme descrito no item 5.2, foram utilizadas neste estudo 10 amostras de ADF, entre as quais uma amostra referia-se a um sistema convencional de indústria de fundição. A seguir os resultados serão apresentados e discutidos.

#### **5.3.1 Coeficiente de Condutividade Hidráulica**

Conforme já mencionado, nos ensaios realizados foram utilizados corpos de prova moldados no teor umidade ótima a partir de ensaios de compactação de energia normal. Os corpos de prova moldados apresentaram índice de vazios conforme Tabela 25.

Tabela 25 Índice de vazios das amostras

| <b>Amostra</b> | <b>índice de vazios<br/>e (%)</b> |
|----------------|-----------------------------------|
| R3             | 0,57                              |
| R4             | 0,63                              |
| R10            | 0,44                              |
| R1             | 0,53                              |
| R5             | 0,57                              |
| R7             | 0,49                              |
| R8             | 0,53                              |
| R9             | 0,49                              |
| R2             | 0,54                              |
| R6             | 0,61                              |

O coeficiente de condutividade hidráulica ( $k$ ) das amostras de ADF apresentou grandezas da ordem de  $10^{-4}$  cm/s a  $10^{-9}$  cm/s conforme a Tabela 26. As amostras com teor de bentonita acima de 6,5%, por possuírem um coeficiente de condutividade hidráulica menor, com o  $k_{\text{médio}}$  igual ou abaixo de  $10^{-6}$  cm/s, podem ser enquadradas nos padrões de utilização para coberturas de aterros industriais classe II.

Segundo o IBAM (2001), os aterros industriais não possuem obrigatoriedade de utilização da camada de impermeabilização para cobertura de aterros, contudo, caso exista essa camada, ela deverá ser constituída de manta plástica ou argila de boa qualidade, com um valor de  $k$  igual ou menor que  $10^{-6}$  cm/s e espessura maior que 50 cm. A amostra de ADF com 4% de teor de bentonita ativada pode ser enquadrada nos mesmos padrões.

Tabela 26 Resultados dos coeficientes de condutividade hidráulica

| Amostra | %         | k (cm/s)  | k (cm/s) | K (c/s)  |
|---------|-----------|-----------|----------|----------|
|         | Bentonita | USP       | LACTEC   | médio    |
| R3      | 4         | -         | 1,31E-04 | 1,31E-04 |
| R4      | 4         | 7,31E-06  | 1,32E-07 | 3,72E-06 |
| R10     | 6,5       | 1,40E-05  | 2,30E-07 | 7,10E-06 |
| R1      | 8         | 4,26E-07  | 3,25E-07 | 3,76E-07 |
| R5      | 8         | 6,40E-08  | 1,01E-07 | 8,27E-08 |
| R7      | 8         | 2,54E-07  | 1,56E-07 | 2,05E-07 |
| R8      | 12        | 1,24E-08  | 1,88E-07 | 1,00E-07 |
| R9      | 12        | 1,19E-08  | 4,99E-08 | 3,09E-08 |
| R2      | 15        | 6,72E-09  | 1,52E-08 | 1,10E-08 |
| R6      | 15        | >1,00E-09 | 1,15E-08 | 6,25E-09 |

A Tabela 26 mostra os resultados de condutividade hidráulica obtidos nos ensaios realizados. Pode-se verificar que a ordem de grandeza dos ensaios realizados nos diferentes laboratórios é aceitável visto que a diferença não se apresentou significativa para os métodos de moldagem de corpos de prova e para a correção da umidade dentro do procedimento padronizado que foi utilizado.

A Figura 9 apresenta um gráfico referente às condutividades hidráulicas versus o teor de bentonita de cada amostra ensaiada considerando a condutividade média dos ensaios realizados.

A relação entre a quantidade presente de bentonita nas amostras e sua permeabilidade foi avaliada através de um estudo da correlação visando determinar uma estimativa da proporção de bentonita que favorece a redução da formação de percolado quando da sua disposição no solo. O estudo da correlação teve por objetivo medir e avaliar o grau de relação existente entre duas variáveis aleatórias, neste caso a quantidade de bentonita e impermeabilização (medida pelo coeficiente de condutividade hidráulica) da amostra. A correlação linear procura medir a relação entre as variáveis X e Y através da disposição dos pontos (X, Y) em torno de uma reta (ARMANGE et al., 2009).

Avaliando as curvas de regressão deste estudo identificou-se que para este intervalo de dados a melhor representação gráfica desta tendência pode ser dada pela curva de regressão exponencial em escala logarítmica. Para curvas de regressão exponencial uma transformação para um modelo linear é realizada visando facilitar a sua interpretação.

O coeficiente de correlação indica se existe alguma associação linear entre duas séries de dados, quando mais próximo o valor de  $r=1$ , melhor a correlação existente entre as variáveis estudadas. Já o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica quanto da variância da variável resposta é explicada pela variância das variáveis envolvidas. Seu valor está no intervalo de 0 a 1. Quanto maior, mais explicativo é o modelo (MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J., 2002).

A partir dos dados da Tabela 26 e da Figura 9, verifica-se que o teor de bentonita influencia na condutividade hidráulica do material. Conforme esperado, nota-se que há uma tendência, com os dados apresentados, de valores de condutividade hidráulica menores para teores de bentonita mais elevados. O coeficiente de correlação para o número de dados avaliados apresentou a relação com valor médio entre as variáveis  $r=-0,6$ .

A equação da regressão da Figura 9 é mais bem representada por  $y = 6E-05e^{-0,973x}$ , tendo seu coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9$ . Para determinação da equação linear uma maior quantidade de avaliações resultará num modelo mais ajustado diante de simulações realizadas com intervalos dos dados analisados. A regressão linear para os dados deste estudo é  $y = -8E-06x + 6E-05$  com  $R^2 0,4$ .

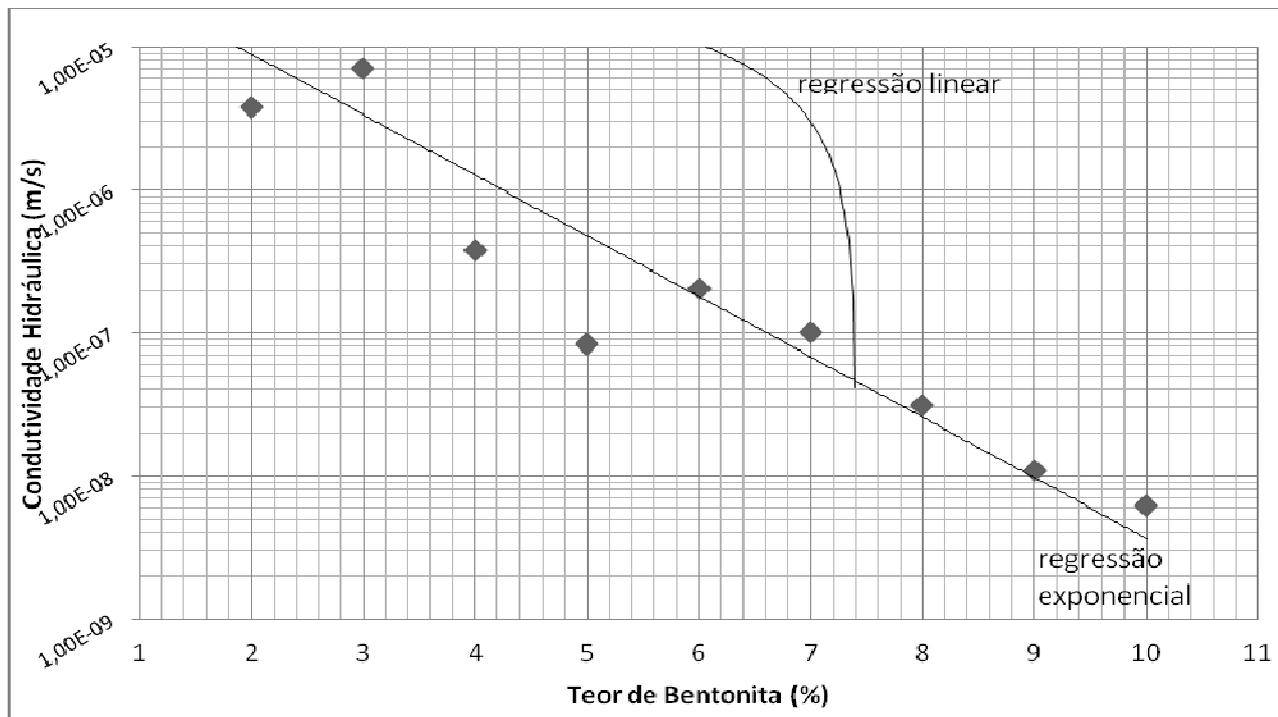


Figura 9 Gráfico do teor de bentonita, em %, pelo coeficiente de condutividade hidráulica, em cm/s, das amostras de ADF.

### 5.3.2 Percolado

O percolado coletado para análises químicas foi obtido após os ensaios de condutividade hidráulica. O volume de percolado coletado equivalia a 500 mL. Nessas condições, foi possível coletar o percolado e avaliar apenas 06 amostras das 10 disponíveis. A diferença de pressão entre a base e topo do corpo de prova foi de 30 kPa até 100kPa, superiores a condições normais de campo e operação de aterros (IBAM, 2001). Mesmo utilizando pressões acima das usuais o tempo necessário para a percolação das demais amostras foi muito elevado, não sendo possível obter a quantidade mínima necessária, tendo em vista o alto teor de bentonita das amostras R2, R6, R8 e R9 observando os valores de condutividade hidráulica próximo a condição de impermeabilidade apontados no item anterior.

Devido ao exposto, pode-se dizer que o aumento do teor de bentonita nas diferentes amostras de ADF influencia a impermeabilização das amostras.

A Tabela 27 apresenta as médias da concentração dos parâmetros presentes analisados do percolado em laboratório. Deve-se levar em consideração que a comparação entre as amostras não é linear ao relacionar a amostra R10, visto que esta possui uma maior quantidade de passagens pelo processo de fundição, apresentando maior interferência.

Tabela 27 Análise química do percolado

| Parâmetros (mg/L) | R3     | R4      | R1     | R5     | R7      | R10     |
|-------------------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|
| %                 |        |         |        |        |         |         |
| Bentonita         | 4      | 4       | 8      | 8      | 8       | 6,5     |
| Al                | 18,9   | 14,3    | 18,8   | 9,0    | 3,4     | 15,2    |
| Ba                | <0,20  | < 0,20  | <0,20  | <0,20  | < 0,20  | 0,957   |
| Cd                | <0,001 | < 0,001 | <0,001 | <0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| Pb                | <0,01  | < 0,01  | 0,15   | 0,31   | < 0,01  | 0,26    |
| Cr                | <0,030 | < 0,030 | <0,030 | <0,030 | < 0,030 | < 0,030 |
| Fenóis            | 0,11   | 0,05    | 0,06   | 0,26   | 0,15    | 0,15    |
| Ferro Total       | 15,15  | 15,18   | 26,32  | 7,01   | 3,81    | 31,47   |
| F <sup>-</sup>    | 0,061  | < 0,100 | 0,095  | 0,029  | 0,123   | < 1,000 |
| Mn                | 0,61   | 0,07    | 0,43   | 0,60   | < 0,005 | 0,49    |

### 5.3.3 Capacidade de Troca De Cátions (CTC)

Apesar dos baixos valores de CTC encontrados nas amostras relativos aos valores de literatura, argilas montmorilonitas de 500 - 1.000 mmol/dm<sup>3</sup>, óxidos de Fe e Al de 20 a 50 mmol/dm<sup>3</sup> (RONQUIM, 2010; SANTOS, 1975; GRIM, 1962), é possível verificar a influência da concentração de bentonita nas amostras conforme resultados apontados na Tabela 28. Os valores de CTC também podem ser expressos em meq/100cm<sup>3</sup> (= mmol/dm<sup>3</sup> dividido por 10). A análise de CTC mostra que o mesmo aumenta proporcionalmente com o aumento dos cátions de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>. Os valores apresentados segundo a soma das bases e saturação das bases também confirmam essa proporção visto que esta influência não foi verificada para Al<sup>3+</sup> e H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>.

O aumento da CTC também cresce com o aumento do pH resultante do aumento de superfície específica causada pelo aumento da concentração de bentonita na amostra. Esse aumento torna-se interessante neste caso onde o aumento do pH com a CTC indicam alta capacidade de retenção de metais conforme observado por Young et al. (1992).

Tabela 28 CTC – Capacidade de Troca Catiônica de ADFs

| Parâmetros<br>(Unidade)                                     | Resultados analíticos por amostra |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|   | R3                                | R4  | R1  | R5  | R7  | R8  | R9  | R2  | R6  | R10 |
| pH em<br>CaCl <sub>2</sub>                                  | 5,7                               | 7,1 | 6,3 | 7,8 | 7,8 | 7,6 | 8,1 | 6,2 | 8,4 | 7,5 |
| K <sup>+</sup><br>(mmol/dm <sup>3</sup> )                   | 0,5                               | 0,6 | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 1   | 1   | 10  | 0,8 | 2,5 |
| Ca <sup>2+</sup><br>(mmol/dm <sup>3</sup> )                 | 20                                | 18  | 34  | 18  | 28  | 45  | 31  | 46  | 25  | 30  |
| Mg <sup>2+</sup><br>(mmol/dm <sup>3</sup> )                 | 7                                 | 8   | 9   | 8   | 11  | 15  | 11  | 13  | 12  | 7   |
| H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup><br>(mmol/dm <sup>3</sup> ) | 10                                | 8   | 10  | 8   | 8   | 9   | 8   | 11  | 8   | 8   |
| Al <sup>3+</sup><br>(mmol/dm <sup>3</sup> )                 | 0                                 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| SB<br>(mmol/dm <sup>3</sup> )                               | 28                                | 27  | 44  | 27  | 40  | 61  | 43  | 60  | 38  | 40  |
| CTC<br>(mmol/dm <sup>3</sup> )                              | 38                                | 35  | 54  | 35  | 48  | 70  | 51  | 71  | 46  | 48  |
| V %   | 73                                | 77  | 81  | 77  | 83  | 87  | 84  | 85  | 83  | 83  |

Legenda: SB – Soma das Bases, CTC – Capacidade de Troca Catiônica V% - Saturação por bases.

### 5.3.4 Teor de Argila Ativa

Na **Tabela 29** e a Figura 10 estão apresentados os resultados do teor de argila ativa das ADF analisadas. Assim como na CTC, na avaliação do teor de argila ativa das ADF foi demonstrado que o quanto maior a quantidade de bentonita presente na amostra maior é sua capacidade de inchamento e adsorção de metais e, como visto na literatura, quanto esse maior for o inchamento da bentonita presente nos materiais menor permeabilidade e percolação.

Tabela 29 Teor de argila ativa das ADF

|         | Resultados analíticos por amostra |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|         | R3                                | R4   | R1   | R5   | R7   | R8   | R9   | R2   | R6   | R10  |
| TAA (%) | 1,45                              | 1,67 | 2,54 | 2,33 | 2,69 | 3,05 | 3,49 | 4,14 | 4,15 | 2,39 |

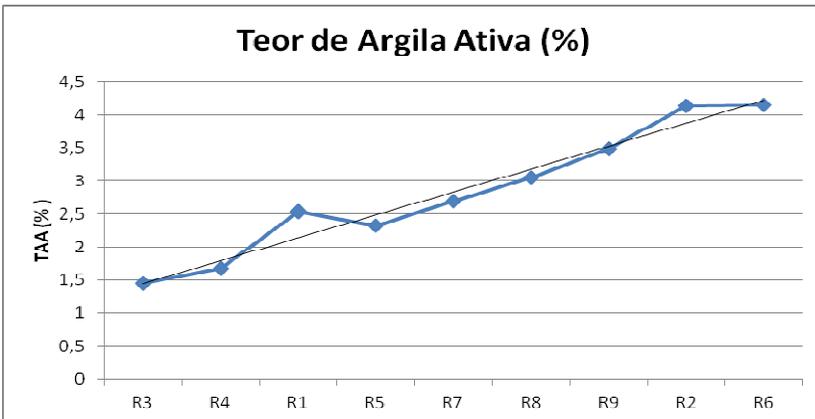


Figura 10 Teor de argila ativa das ADF

## 5.4 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho permitiram analisar a influência do teor de bentonita presente nas ADFs como agente de impermeabilização

e limitação da geração de percolados. A bentonita apresentou características químicas, físicas e geotécnicas que diante das condições do ensaio influenciaram a qualidade e quantidade do percolado mostrando que existe relação entre a condutividade hidráulica e a formação de percolado decorrente da disposição de ADF com diferentes teores de bentonita.

O monitoramento de águas subterrâneas em áreas de disposição de ADF deve servir como meio de controle do risco juntamente com a condutividade hidráulica do material disposto. O mesmo pode ser dito quanto há intenção de uso da ADF em aplicações geotécnicas, monitorando o comportamento e conhecendo sua composição para o controle das propriedades mecânicas do resíduo para favorecer seu uso.

Os dados obtidos neste estudo colaboram também na definição de parâmetros e métodos aplicáveis para execução de centrais de processamento, armazenamento e destinação final de ADF conforme NBR 15984 (ABNT, 2011) visto que a condutividade hidráulica e a formação de percolado são valores necessários na elaboração de projetos construtivos. Assim, conhecendo a relação entre a quantidade de bentonita no material e a permeabilidade é possível controlar sua percolação para atender as exigências ambientais tanto para uso como para disposição.

## CAPÍTULO 6 DISCUSSÃO GERAL E CONCLUSÃO

A existência de passivos ambientais provenientes da disposição de ADF realizada sem controle diante da regulamentação nas esferas locais, estaduais e federais, conforme demonstrado no início desta tese expôs a necessidade de dispor de um conhecimento completo do resíduo proporcionando assim maneiras adequadas para seu gerenciamento, valorização e redução dos riscos de impactos adversos ao meio ambiente.

Sob esta ótica esta tese foi elaborada, partindo do princípio em conhecer os riscos associados ao ciclo produtivo onde as ADFs são geradas, identificando dentre as matérias primas pontos que possam favorecer o controle. Adicionalmente avaliaram-se as propriedades que possibilitem estabelecer uma relação entre a contenção de contaminantes e a percolação das areias quando dispostas em solo ou utilizadas para outras aplicações diferentes do processo que as originou.

Assim, a questão central levantada por este estudo, “A contaminação de solo e águas subterrâneas decorrente da disposição de Areia Descartada de Fundição é alterada pela presença de aditivos em sua composição?” pode ser respondida de forma afirmativa considerando os resultados deste estudo suas delimitações, etapas metodológicas e objetivos propostos desta tese. Essa questão não contemplou a avaliação de outros resíduos do ciclo produtivo de produção tais como resíduos de atividade de acabamento de peças ou fusão de metais. Também não considerou as propriedades de diferentes solos para disposição. Nesta tese foi considerada a alteração do impacto ambiental da ADF em função da bentonita presente no resíduo.

Dentro do objetivo de identificação dos riscos, humano e ecológico, o uso da metodologia que levou em consideração os fatores de contaminação do solo e águas subterrâneas, importantes para disposição e aplicações de ADF, mostrou que tanto em relação a efeitos carcinogênicos, não carcinogênicos, não seriam necessárias ações em um nível que pudesse exigir o uso de métodos de minimização da exposição a seus constituintes, pois os resultados encontraram-se dentro dos limites aceitáveis contidos na legislação pertinente relacionada. O detalhamento da pesquisa (Anexo 1) demonstrou que para o risco ecológico dos resíduos de moldagem de ADF, que possui maior volume

de geração, menos de 10% dos resultados apresentaram algum risco para os padrões brasileiros de controle de impacto ambiental e até 15% para os padrões internacionais utilizados. Ainda dentro deste contexto, os elementos que conferiram risco humano e ecológico (ferro, alumínio e manganês) estão frequentemente associados à composição natural dos solos ou para aplicações nas quais pode ser destinado o uso das ADF conforme a literatura outrora apresentada.

A partir dos resultados da incidência do risco ao longo do ciclo de vida da ADF o estudo foi aprofundado com objetivo de identificar a causa que poderia auxiliar no controle para prover meios de reproduzir o baixo risco na execução de atividades de monitoramento, disposição e reutilização de ADF. Ficou evidenciado que o risco era reduzido para matérias primas, aumentando ao longo do processo e com valores semelhantes aos das matérias primas na fase final de descarte onde o resíduo da ADF do processo de moldagem é gerado.

Com a identificação das matérias primas utilizadas que compõe as ADF e com a constatação do uso de uma argila no processo de fundição, neste caso a bentonita, que também é utilizada para atenuar impactos ambientais em outras atividades, o objetivo do capítulo seguinte foi de estudar a interação entre a bentonita e os materiais presentes nas areias descartadas de fundição caracterizando as suas propriedades geotécnicas físicas e químicas como uma das causas de redução do risco de contaminação de solo e água subterrânea.

Esse estudo das propriedades de ADF em misturas com diferentes teores de bentonita demonstrou características desta argila para a sua contribuição como material impermeabilizante do resíduo, indicando que as amostras tornaram-se mais compressíveis na medida em que houve aumento de argila em sua composição, influenciando o comportamento mecânico e químico do resíduo na geração do percolado.

No entanto, como na análise de lixiviação o comportamento do percolado não teve essa influencia efetuou-se o último objetivo desta tese a fim de estudar o parâmetro que poderia ser controlado pela adição de argila avaliando a relação entre a permeabilidade e a percolação das ADFs, como meio de contenção dos contaminantes diante da proporção entre a quantidade de bentonita e a mistura de areia descartada de fundição.

Face aos resultados demonstrados nos ensaios de condutividade hidráulica, análise de percolado e capacidade de troca de cátions foi possível verificar, que existe relação entre a condutividade hidráulica e a formação de percolado diante de diferentes teores de bentonita. Assim foi possível comprovar a hipótese que “A bentonita, presente na Areia Descartada de Fundação, atua como material encapsulante e impermeabilizante quando da disposição desta no solo”. Foi comprovado que a sua presença e o aumento da sua concentração nas ADFs reduzem a permeabilidade, limita a formação de percolado durante sua disposição ou utilização (em especial nas aplicações geotécnicas) e que possui propriedade potencial de retenção de metais representado pela sua capacidade de troca catiônica.

Essa hipótese auxilia na explicação do baixo risco demonstrado em estudos de caso de monitoramento de águas subterrâneas de áreas de disposição, análises de lixiviados ou solubilizados de ADF, vistos na literatura, onde os principais elementos detectados são ferro, alumínio e manganês, presentes tanto na composição do solo como nos resíduos e na matéria prima de controle em questão (bentonita).

Essa informação é importante para o gerenciamento de áreas contaminadas seguindo os procedimentos da Resolução nº 420 (CONAMA: 2009) na qual os projetos de recuperação devem prever as causas da existência ou não de riscos associados à disposição de resíduos e suas medidas de controle como o monitoramento de propriedades químicas, físicas e geotécnicas do material disposto.

Adicionalmente mediante ao conhecimento da condutividade hidráulica da ADF é possível prever o grau de percolação e fazer ajustes no processo de modo a fornecer dados e favorecer projetos de disposição como o critério disposto na norma ABNT NBR 15984:2011 ou em aplicações onde o controle da percolação é requerido, como exemplo o uso em coberturas de aterro sanitário possibilitado pela norma ABNT BR 15702:2009.

Diante destas considerações este projeto proporciona às indústrias de fundição a melhoria da análise e investigação ambiental para o auxílio na tomada de decisão da adoção da melhor alternativa para armazenamento e ou aproveitamento de resíduos que podem promover a

minimização de uso de recursos naturais e a revisão dos conceitos de avaliação aos passivos existentes.

## CONCLUSÃO GERAL

Finalmente, este estudo cumpriu com seu objetivo em analisar e avaliar a influência da bentonita na Areia Descartada de Fundição diante do risco de contaminação de solo e água subterrâneas decorrente da disposição desta no solo.

Assim, os resultados obtidos com as análises realizadas neste estudo permitem concluir que a bentonita, presente na composição de Areias Descartadas de Fundição, atua como material encapsulante e impermeabilizante quando estes resíduos são dispostos em solo ou reutilizados.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos adicionais podem ser realizados visando utilizar menores valores para o limite de quantificação dos métodos utilizados para os elementos onde o risco não foi verificado.

Outros elementos podem ser analisados para a avaliação de risco considerando outros processos produtivos ou processos adicionais que incorporem outros elementos em atividades de reaproveitamento, por exemplo.

Valores de águas subterrâneas de passivos ambientais podem ser utilizados pela ferramenta de análise de risco visando identificar valores de disposição já efetuada. Neste caso a avaliação contemplara a influencia do solo no qual o material está disposto.

Ensaio de condutividade hidráulica de amostras de diferentes processos de fundição podem ser efetuados visando identificar diferenças entre os processos produtivos.

Ensaio de condutividade hidráulica com adição de diferentes argilas ao final do processo, diretamente no resíduo antes do descarte podem auxiliar na definição da proporção de exata de material para controle da variável em função das diferentes aplicações.

## REFERÊNCIAS

1. ABICHOU, T. BENSON, C.H.; EDIL T.B.; FREBER, B.W. Using waste foundry sand for hydraulic barriers. Recycled Materials in Geotechnical Applications. In: GeoCongress, 1998. **Anais...** Boston, 1998. University of Wisconsin.
2. AMERICAN FOUNDRY SOCIETY - AFS. **Foundry sand: material description.** 2003. Disponível em: <<http://www.rmrc.unh.edu/Partners/UserGuide/fs1.htm>>. Acesso em: 13/08/2003.
3. AMERICAN FOUNDRY SOCIETY - AFS. Disponível em: <<http://www.afsinc.org>>. Acesso em: 24 jan.2012.
4. AMERICAN FOUNDRYMEN SOCIETY - AFS. **Foundry Sand Beneficial Reuse Manual (Special Report).** Atlanta: Illinois Department Of Commerce And Community Affairs, 1996. 24 p. Concessions No. 90-82109.
5. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION AND WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **2540B:** Standard methods for the examination of water and wastewater. 20 th edition. APHA – AWWA – WEF, Washington, D.C. 1998
6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTS AND MATERIALS. **ASTM D5084-90:** Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. Philadelphia, 8p. 1997.
7. ARMANGE, L.C., NEPPEL, L.F., GEMELLI, E.; HERIBERTO, N., CAMARGO, A.. Utilização de Areia de Fundação Residual para uso em Argamassa. **Revista Matéria**, v. 10, n. 1, p. 51-62, 01 mar. 2005.
8. ARMANGE, L.C.; NEPPEL L.F.; GEMELLI E.; CAMARGO, N.H.A.C. Estudo sobre a correlação dos ensaios de permeabilidade x módulo de finura em areia base. In: CONGRESSO DE FUNDIÇÃO, 14., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Abifa, 2009. p. 1 - 9. CD-ROM.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO -ABIFA. **CEMP 197:** Areias para fundição – determinação do teor de argila ativa pelo método da curva de regressão e da adsorção.2004.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO -ABIFA. *Guia ABIFA de Fundação: Anuário 2012.* **ABIFA.** 2012. 226 p.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8.418**: Apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos- Procedimento. Rio de Janeiro, 1984 a.
12. ASSOCIACAO BRASIELIRA DE NORMAS TECNICAS-ABNT. **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b.
13. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS-ABNT. **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984c.
14. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS-ABNT. **NBR 7180**: solo - determinação do limite de **plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984 d.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.849**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. Rio de Janeiro, 1985.
16. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS-ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986 a.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7182**: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986b.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 10.157**. Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação – Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.
19. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS-ABNT. **NBR 12860**: Materiais refratários magnesianos – Análise química por espectrometria de fluorescência de raio X. Rio de Janeiro, 1993.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 13.896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.
22. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS-ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004 a.

23. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS-ABNT. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.
24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.
25. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 15.113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004 d.
26. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004e.
27. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS-ABNT. **NBR 15.702**: Areia descartada de fundição - Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009.
28. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 15.984**: Areia descartada de fundição: Central para processamento, armazenamento e destinação. Rio de Janeiro, 2011.
29. AZAMBUJA, R.M.B. **Comportamento mecânico e hidráulico de misturas solo-cimento-bentonita para a aplicação em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
30. BAIL, R.S., BOUSFIELD, P.M., LOBO, M.G. E CHEGATTI, S.. **Uso do software SADA na estimativa do risco à saúde humana decorrente da exposição ao resíduo de areia de moldagem de fundição de ferro**. 2010. Disponível em: <[http://www.interfacehs.sp.senac.br/images/artigos/232\\_pdf.pdf](http://www.interfacehs.sp.senac.br/images/artigos/232_pdf.pdf)>. Acesso em: 26 jun. 2010
31. BASTIAN, K.C.; ALLEMAN, J.E. Microtox™ Characterization of foundry sand residuals. **Waste Management**, v. 18, n. 4, p. 227-234, 01 jul., 1998.
32. BILOLO, S.M. **Reuso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos**. 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Área de Concentração Tecnologia Mineral / Metalurgia Extrativa) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

33. BIOLO, S.M. Utilização da areia de fundição na fabricação de blocos cerâmicos. **Revista Fundição & Matérias Primas**: 54-59 p. 2003.
34. BONET, I.I. **Valorização do resíduo de areia de fundição (R.A.F.): incorporação nas massas asfálticas do Tipo C.B.U.Q.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
35. BONET, I.I.; PANAROTTO, C. T.; POSSAMAI, O. Valorização do resíduo areia de fundição (RAF): incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q. (concreto betuminoso usinado a quente). In: . CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003. **Anais...** Joinville: Abes, 2003. p.1 - 12.
36. BOYLE, W.C.; HAM, R.K.; ENGROFF E.C.; FERRO, R.L. Determining the presence of organic compounds in foundry waste leachate. **Modern Casting**, p. 27-31, July 1989.
37. BOYLE, W.C.; HAM, R. Research reveals characteristics of ferrous foundry wastes. **Modern Casting**, p. 37-41, Feb 1990.
38. BRAGA, R.M. **Uso de argilominerais e diatomita como adsorvente de fenóis em águas produzidas na indústria de petróleo.** 2008. 82 f Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo). Curso de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
39. BRASIL. Lei n. 12.305, de 3 de agosto de 2010. Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **DOFC** - Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil, Brasília col. 1; p.3. PODER LEGISLATIVO.
40. CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas.** Campinas, Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada).
41. CAMPOS FILHO, M.P.D. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.
42. CASTRO, C.A.G.D. A Produção de Areia Base para Fundição e o Meio Ambiente. In: CONAF, São Paulo, 2001. **Anais...** Abifa. p.1 - 18.
43. CARNIN, R.L.P. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas.**

2008. 152 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- 44.CARNIN, R.L.P.; OLIVEIRA, E. M. D.; CUNHA, C. J. D. Estudo ambiental do resíduo de areis verde de fundição e comparação dos resultados com a norma de classificação de resíduos. In: . CONAF, 2007, 2007. **Anais...** . São Paulo: Abifa, 2007. p.1 - 19.
- 45.CASTILHOS, Z.C., CASTRO, A.M.; RAMOS, A.S.; LIMA, C.A.; RODRIGUES, A.P.C. **Avaliação de riscos à saúde humana: conceitos e metodologia.** Rio de Janeiro: CETEM, 2009. 54 p.
- 46.CHAVES, L.A.O. ; MAINIER, F.B. Análise dos estudos de riscos ambientais nas atividades petrolíferas. In: SIMPEP, 12., 2005, Bauru. **Anais...** . Bauru: 7 a 9 de Novembro de 2005. p. 01 - 10.
- 47.CHEGATTI, S. **Análise do processo produtivo de uma fundição visando detectar diferentes pontos geradores de resíduos para reciclagem.** 1999. 70 f Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Química Industrial). Universidade da Região de Joinville, Joinville.
- 48.CHEGATTI, S. **Aplicação de resíduos de fundição em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas.** 2004. 122 f (Mestrado em Engenharia Ambiental). Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- 49.CHEGATTI, S.; MAÇANEIRO, P.C.; CARNIN, R.L.P; ARMANGE, L.C.; FARIAS, E.W. Desenvolvimento e implantação de norma para o reuso de areias descartadas de fundição em Santa Catarina: Uma abordagem legislativa e técnica. In: . CONGRESSO DE FUNDIÇÃO 14, 2009. **Anais...** Abifa, São Paulo. p.1 - 9.
- 50.CHURCHMAN, G.J.; ASKARY, M.; PETER, P.; WRIGHT, M.; RAVEN, M.D.; SELF, P.G. Geotechnical properties indicating environmental uses for an unusual Australian bentonite. **Applied Clay Science.** South Australia. v. 20: p.199-209, 99 p. 2002.
- 51.COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Avaliação de risco à saúde humana.** Disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/Capitulo\\_IX.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/Capitulo_IX.pdf). Acesso em: 13 ago. 2009a.

52. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decisão de diretoria Nº 103/2007/C/E, de 22 de junho de 2007.** CETESB. São Paulo 2007.
53. CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução. 011.** SDS. Florianópolis: CONSEMA, 2008.
54. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução. 396.** MMA. Brasília: CONAMA, 2008.
55. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução. 420.** MMA. Brasília: CONAMA, 2009
56. CUNHA, I.A. Gerenciamento de riscos ambientais e a política de proteção dos mananciais em São Paulo. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente.** São Paulo: INTERFACEHS. v. 3: 1-15 p. 2008.
57. DALI-YOUCHEF, Z.; BOUABDASSELEM, H.; BETTAHAR, N. Élimination des composés organiques par des argiles locales. **Comptes Rendus Chimie**, v. v. 9, n. n. 10, p. p.1295-1300, Oran, ago. 2006.
58. DIAS, D.M.; ALCÂNTARA, G. R. de; REIS, E.F. dos. Relação entre o limite de plasticidade e a umidade ótima de compactação de um latossolo vermelho-escuro em diferentes condições de uso. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, p. 25-32. 01 fev. 2012.
59. DUNGAN, R.S.; HUWE, J.; CHANEY, R.L. Concentrations of PCDD/PCDFs and PCBs in spent foundry sands. **Chemosphere**, p. p. 1232-1235, May 2009.
60. DUNGAN, R.S.; KUKIER, U.; LEE, B. Blending foundry sands with soil: Effect on dehydrogenase activity. **Science Of The Total Environment**, v. 357, n. 1-3, p. 221-230, 15 Mar, 2006.
61. EGLOFFSTEIN, T.A. Natural bentonites influence of the ion exchange and partial desiccation **Geomembranes**, v. v. 19, p. p.427-444, 2001.
62. FERRARI, A.A.M. **Viabilidade de utilização de silte compactado como material de impermeabilização de aterros de resíduos.** 2005.118p. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2005.
63. FERREIRA, G.C.; DAITX, E.C. A mineração de areia industrial na Região. **Rem: Revista Escola de Minas.** Ouro Preto. v. 56: p.59-65 p. 2003.
64. FERREIRA, M.A.D.S. **Aplicação de modelos de avaliação qualitativa e quantitativa dos percolados gerados em um aterro sanitário.** 2006. 227p. Dissertação (Mestrado). Ciências

em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- 65.FIORI, S; MELO, E.F.R.Q.; CORONETTI, L.; THOMÉ, A.; SCHNEIDER, I. A. **A recuperação natural de uma antiga área de disposição de areia de fundição.** In: CONAF 2003 - Congresso de Fundição, 2003, São Paulo, SP, 2003.
- 66.FLORIDO, C. **Estudo das características da areia descartada de fundição - da material-prima ao produto final.** 2007. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- 67.GALVÃO, FILHO J.B. Gestão de risco ambiental. **Banas Ambiental**, São Paulo, v. 2, n.12, p.32-41, jun. 2001.
- 68.GLOAGUEN, R.A.B.G. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado nas propriedades físico-hídricas de um latossolo.** 2005. 120 f. Tese (Doutor) - Curso de Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.
- 69.GONÇALVES, M. K. **Estudo da Relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e a percolação de areias descartadas de fundição com diferentes teores de bentonita em sua composição.** 2011. 79 f. Trabalho de Conclusão (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- 70.GIANNINI, A.R. Resinas sintéticas para aglomeração de areia. **Mineração & metalurgia**, 1995.
- 71.GRIM, R.E. **Applied Clay Mineralogy.** New York: Mcgraw-hill Book, 1962. 422 p.
- 72.GUESSER, W.L. **Estudo sobre bentonitas brasileiras em areia de moldagem.** 1982. 223 f Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.
- 73.HEINECK, K.S.; BICA, A.V.D.; CONSOLI, N.C.; FLORES, J.A.A.F. **Estudo da morfologia e condutividade hidráulica de misturas de cinza de carvão-bentonita.** 2002. Disponível em:  
<<http://www.karlaheineck.eng.br/publicacoes/1187701146COBRAMSEG%20-202002%20-%2001.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2009.

74. IBAM. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. 15ed. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. ISBN 85-09-00113-8.
75. ITO, H. Compaction properties of granular bentonites. **Applied Clay Science**, v. 31, n. 1-2, p. 47-55, Tochigi, Jan. 2006.
76. IWAI, C.R. **Tratamento de chorume através de percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros para resíduos sólidos urbanos**. 2005. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Universidade Estadual de São Paulo, 2005.
77. KOCH, D. Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls. **Applied Clay Science**, v. 21, n. 1-2, p. 1-11, Mannheim, abr. 2002.
78. KONDIC, V. **Princípios metalúrgicos de fundição**. São Paulo: ed. Polígono, 1973.
79. LAGO, B.D. **Bentonita com menor tendência defeito à Fundição**. 2009. Disponível em: <<http://www.distribuidorapatagonica.com.br/bentonita.html>>. Acesso em: 20 maio 2009.
80. LEMOS, R.G.; LAUTENSCHLAGER, C.E.R.; HEINECK, K.S.; CONSOLI, N.C. **Barreiras hidráulicas verticais compostas de solo residual - cimento - bentonita sódica: análise por microscopia eletrônica de varredura**. 2005. Disponível em: <<http://www.karlaheineck.eng.br/publicacoes/1187700418GEORS%20-%202005%20-%2001.pdf>>. Acesso em: 21 maio 2009.
81. LUKIANTCHUKI, J.A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
82. LUZ, A.B.D.; OLIVEIRA, C.H.D. **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: Cetem, 2005. p 217-230.
83. MACIEL, C.B. **Avaliação da geração do resíduo sólido areia de fundição visando sua minimização na empresa metalcorte metalurgia-fundição**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Modalidade Profissionalizante Ênfase em Engenharia Ambiental e Tecnologias Limpas) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

84. MAHASNEH, B.Z.; SHAWABKEH, R.A. Compressive Strength and Permeability of Sand-Cement-Clay Composite and Application for Heavy Metals Stabilization. **The Electronic Journal Of Geotechnical Engineering**, p.p. 1-11, 2005. Disponível em: <<http://www.ejge.com/2005/JourTOC10B.htm>>. Acesso em: 01 jan.2007.
85. MATOS, S.V.; SCHALCH, V. Alternativas de minimização de resíduos da indústria de fundição. In: CONGRESSO, I. D. E. S. E. A., Porto Alegre, 2000. **Anais...** Abes. p.1742 - 1753.
86. MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J., Algumas considerações em regressão não linear. **Acta Scientiarum**. v. 24, n. 6, p. 1761-1770, 2002. Disponível em: <http://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/2551/1574>>. Acesso em: 5 jul. 2012.
87. MEDEIROS, M. **História da Fundição**. São Paulo: Magma Cultural, Salus, 2009. 156 p.
88. MELLO, O.J. **Estudo da viabilidade de reutilização de resíduo de areia verde de fundição em argamassa colante: enfoque ambiental**. 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2004.
89. NASCIMENTO, M. R. D. **Estudo da influência da bentonita e do pó de carvão na hidratação do cimento Portland**. 2006. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2006.
90. NETO, M.L.F.; SARCINELLI, P.N. Agrotóxicos em água para consumo humano: uma abordagem de avaliação de risco e contribuição ao processo de atualização da legislação brasileira. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p.69-78, jan.-mar. 2009.
91. OKIDA, J.R. **Estudo para minimização e aproveitamento de resíduos sólidos de fundição**. 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2006.
92. OLIVEIRA, T.M.N.D. **Eco-estratégia empresarial no setor metal-mecânico da escola técnica Tupy**. 1998. Tese (Doutorado). Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
93. OLIVEIRA, D.M.D. **Aplicação da técnica de solidificação/estabilização para resíduos oleosos da**

- indústria petrolífera utilizando solo argiloso e bentonita.** 2003. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
94. OMARI, A.A.M.A. **Analysis of HMA Permeability through Microstructure Characterization and Simulation of fluid flow in X-Ray CT Images.** 2004. 207 Tese (Doutorado). Filosofia, Texas A&m University, College Station, 2004.
95. ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995. 2 ed.
96. OUHADI, V.R.; YONG, R.; SEDIGHI, M. Desorption response and degradation of buffering capability of bentonite, subjected to heavy metal contaminants. **Engineering Geology**, v. 85, n. n. 1-2, p. 102-110, Hamedan, 26 maio 2006.
97. PEREIRA, R.L.; SCHMIDT, A.D.; ALMEIDA, N.H.C.; VERRAN, G.O. Parte I: Utilização de resíduo de areia verde de fundição na preparação de argamassa para aplicação na construção civil. In: CONGRESSO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS DA REGIÃO SUL, 01., 2000, Joinville. **Anais...** Joinville: Sulmat, 2000. p. 204 - 213.
98. PEREIRA, A. **Estudo da viabilidade técnica e ambiental da incorporação de resíduo de areia de fundição em matriz asfáltica.** 2004. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2004.
99. PERINI, P.R. **Fundição.** Escola Técnica Federal de Santa Catarina. 1986.
100. QUISSINI, C.S. **Estudo da aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, 2009.
101. RIBEIRO, R.A.C. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal-mecânicos.** 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado Engenharia e Ciência Dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
102. RODRIGUES, M.G.F.; SILVA, M.L.P.; SILVA, M.G.C.D. Caracterização da argila bentonítica para utilização na remoção de chumbo de efluentes sintéticos. **Revista Cerâmica.** Brasil. v.50: 190-196 p. 2004.

103. RONQUIM, C.C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais:** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. 1ª edição Campinas: Embrapa, 2010. 26 p. (III).
104. SALAMZADEH, E.S. **The study of two laboratory leaching tests on foundry solid wastes.** 1985. 82 p Thesis (Master in Civil and Environmental Engineering). University Of Wisconsin, Wisconsin.
105. SAMINGAN A.S.; LEONG E.C.; RAHARDJO, H. A Flexible Wall Permeameter for Measurements of Water and Air Coefficients of Permeability of Residual Soils, Canadian Geotechnical Journal, nº 40, p. 559-574, 2003.
106. SAMPLE, B.E.; SUTER G.W.; EFROYMSON R.A.; JONES D.S. A guide to the ORNL ecotoxicological screening benchmarks: background, development, and application. 1998. Disponível em: <<http://www.esd.ornl.gov/programs/ecorisk/documents/whtppr21.pdf>>. Acesso em: 10 fev.2010.
107. SANTOS, L.V.D. **Estudo da influência de uma bentonita em um solo residual para uso como camada selante.** 2008. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
108. SANTOS, P.S. **Tecnologia de Argilas Aplicada às Argilas Brasileiras.** 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1975. 1 v.
109. SILVA, T.C.D. **Comparativo entre os regulamentos existentes para reutilização de resíduos de fundição.** 2007. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
110. SKVÁRA, F.; KASTÁNEK, F.; PAVELKOVÁ, I.; SOLCOVÁ, O.; MALÉTEROVÁ, Y.; SCHNEIDER, P. Solidification of waste steel foundry dust with portland cement. **Journal of Hazardous Materials**, v. B89, p. 67-81, 2002.
111. SMITH, E.; STEPHENS, W.; KUNE, T. Making your foundry's waste work for you: constructive use and reclamation. **Modern Casting**, p.43-45, May, 1982.
112. SOGABE, M.N. Avaliação e gerenciamento de risco. **Modelos e ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações.** São Paulo: Senac, 2006. p. 219-246.
113. STANDARD METHODS (EUA). **3111 B: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition**, 2005a.

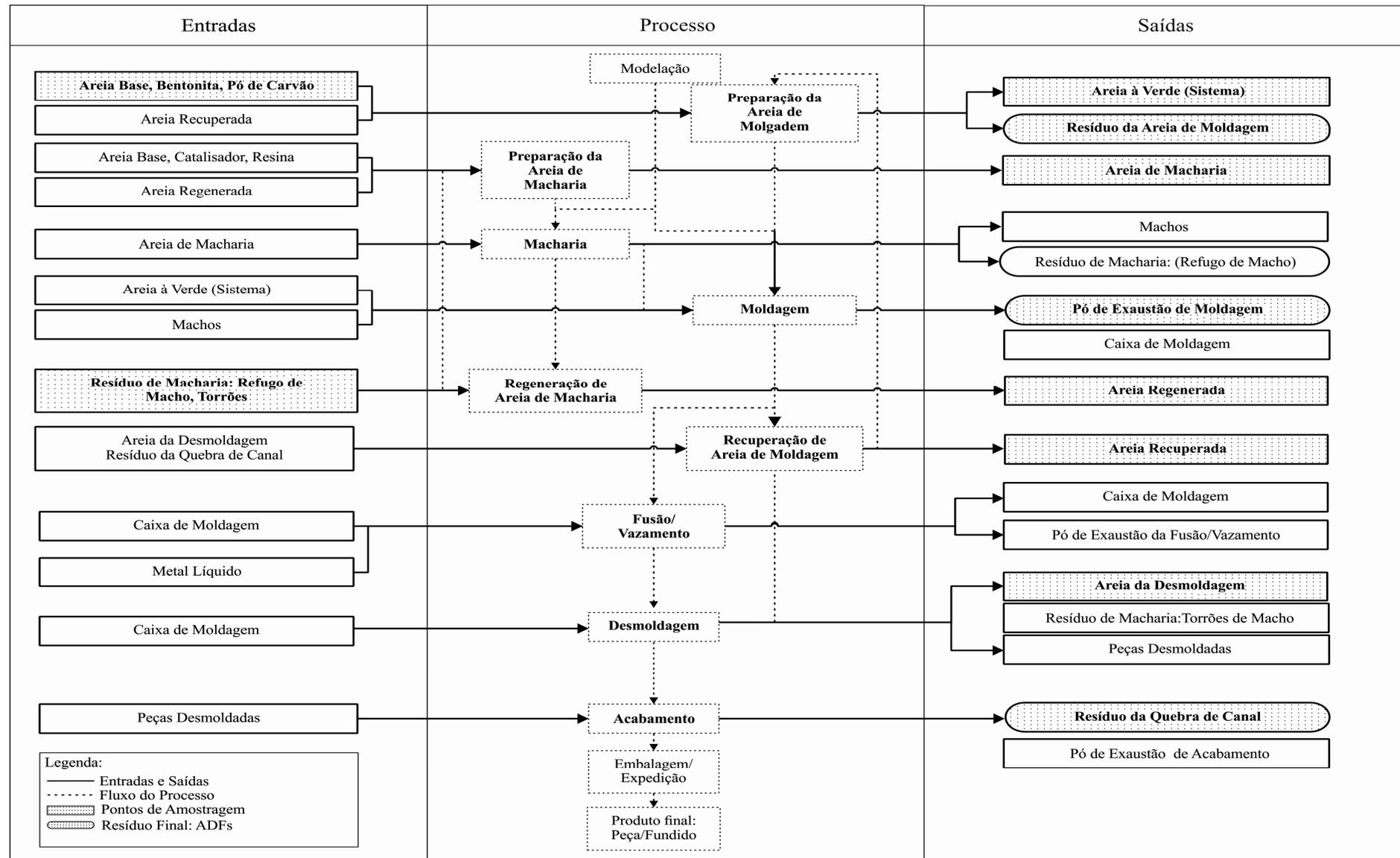
114. STANDARD METHODS (EUA). **3111 D: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** 20th Edition, 2005b.
115. TOLEDO, E.B.S. **Método de utilização de areia de fundição e resíduos de poeira de jateamento (micro esferas de vidro) para produzir cerâmica vermelha.** 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência Dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
116. UNIVERSITY OF TENNESSEE. **SADA, versão 5.** Knoxville: University of Tennessee, 2009.
117. US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Human Health Evaluation Manual: Part A.** December, 1989.
118. VAUNAT, J.; GENS, A. Analysis of the hydration of a bentonite seal in a deep radioactive waste repository. **Engineering Geology**, Barcelona, v. 81, n. 3, p. 317-328, 01 ago 2005.
119. VILLAR, M.V.; GARCIA-SINERIZ, J.L. ; BARCENA, I.; LLORET, A. State of the bentonite barrier after five years operation of an in situ test simulating a high level radioactive waste repository. **Engineering Geology**, v. 80, n. 3-4, p. 175-198, 2005.
120. VIOTTI, G.C.D.A. **Desenvolvimento e caracterização de argilas organofílicas para uso em alimentação animal como adsorvente inativador de micotoxinas: Aflavoxina B1 e Fumonisina B1.** 2006. 216 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
121. WALDEN, W.C. **Alternate use of sand.** TECHNIKON LLC Mcclellan: 6 may 2003, p.6. 2003
122. WATANABE, F.A. **Estudo sobre a utilização de areia de fundição residual como agregado na confecção de pavimentos de concreto.** 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004.
123. WINKLER, E.S.; BOL'SHAKOV, A.A. **Characterization of foundry sand waste.** Chelsea: University Of Massachusetts, 2000. 71 p. (Tecnical Report # 31).
124. WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **IPCS risk assessment terminology.** Geneva: Who, 2004. (Harmonization Project Document).

125. WRIGHT, J. Take a new look at sand reclamation. **Foundry Management & Technology**, p. 22, March 2001.
126. YONG, R. N.; MOHAMED, AM. O., WARKENTING, B.P. Principles of contaminant transport in soils. **Development in geotechnical engineering**. Netherlands: Elsevier Science Publishers, 1992. 327 p.

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1 AVALIAÇÃO DE RISCO DAS AMOSTRAS DO CICLO DE VIDA DAS AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO**

### 1.1 Detalhe do Fluxograma do Ciclo de Vida das Areias Descartadas de Fundição



## 1.2 Resultados das Análises de Massa Bruta das amostras do Ciclo de vida das Areias Descartadas de Fundição

| Informações |               |                              |    |          | Resultados (mg/kg) |         |         |        |         |        |         |        |        |       | pH   |
|-------------|---------------|------------------------------|----|----------|--------------------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|-------|------|
| Laudo       | Tipo          | Amostra                      | n° | Análise  | Al                 | Ba      | Cd      | Pb     | Cr      | Fenol  | Fe      | F      | Mn     | Zn    |      |
| 39.783      | Matéria-prima | Bentonita Sódica Natural     | 1  | M. Bruta | 424,57             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,245  | 243,87  | < 2,20 | 39,07  | 6,7   | 7,22 |
| 39.786      | Matéria-prima | Bentonita Sódica Natural     | 2  | M. Bruta | 424,12             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,229  | 246,03  | < 2,20 | 40,81  | 5,9   | 7,42 |
| 39.789      | Matéria-prima | Bentonita Sódica Natural     | 3  | M. Bruta | 425,63             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,211  | 245,28  | < 2,20 | 48,23  | 6     | 7,6  |
| 39.810      | Matéria-prima | Bentonita Ativada            | 1  | M. Bruta | 399,17             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,218  | 250,74  | < 2,20 | 47,71  | 3     | 9,89 |
| 39.813      | Matéria-prima | Bentonita Ativada            | 2  | M. Bruta | 394,45             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,191  | 218,79  | < 2,20 | 55,27  | 3,2   | 9,71 |
| 39.816      | Matéria-prima | Bentonita Ativada            | 3  | M. Bruta | 390,28             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,198  | 249,45  | < 2,20 | 53,64  | 3     | 9,84 |
| 39.828      | Matéria-prima | Areia Base                   | 1  | M. Bruta | 220,26             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,171  | 44,88   | < 2,20 | 0,84   | 1,8   | 9    |
| 39.831      | Matéria-prima | Areia Base                   | 2  | M. Bruta | 242,97             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,206  | 45,8    | < 2,20 | 1,09   | 2,1   | 9,04 |
| 39.834      | Matéria-prima | Areia Base                   | 3  | M. Bruta | 238,72             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,236  | 45,56   | < 2,20 | 0,82   | 2     | 8,45 |
| 39.837      | Matéria-prima | Bent. Sód. Ativ + Nat.       | 1  | M. Bruta | 1630,59            | 57,27   | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,562  | 1244,25 | < 2,20 | 107,76 | 10,4  | 8,91 |
| 39.840      | Matéria-prima | Bent. Sód. Ativ + Nat.       | 2  | M. Bruta | 1608,35            | 59,75   | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,593  | 1235,12 | < 2,20 | 102,49 | 9,6   | 8,67 |
| 39.843      | Matéria-prima | Bent. Sód. Ativ + Nat.       | 3  | M. Bruta | 1640,98            | 52,689  | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,337  | 1238,95 | < 2,20 | 114,51 | 10    | 8,90 |
| 39.893      | Matéria-prima | Pó de Carvão Aditivado       | 1  | M. Bruta | < 2,50             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,276  | 132,72  | < 2,20 | 6,97   | 2,7   | 6,12 |
| 39.896      | Matéria-prima | Pó de Carvão Aditivado       | 2  | M. Bruta | < 2,50             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,341  | 142,3   | < 2,20 | 6,13   | 3,1   | 6,6  |
| 39.899      | Matéria-prima | Pó de Carvão Aditivado       | 3  | M. Bruta | < 2,50             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,313  | 133,79  | < 2,20 | 5,8    | 3,0   | 5,55 |
| 39.902      | Matéria-prima | Pó de Carvão                 | 1  | M. Bruta | < 2,50             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,294  | 184,78  | < 2,20 | 8,55   | 315,5 | 6,71 |
| 39.905      | Matéria-prima | Pó de Carvão                 | 2  | M. Bruta | < 2,50             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,15   | 172,02  | < 2,20 | 8,36   | 316,8 | 6,57 |
| 39.908      | Matéria-prima | Pó de Carvão                 | 3  | M. Bruta | < 2,50             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,247  | 190,04  | < 2,20 | 8,85   | 318,6 | 6,59 |
| 39.801      | Processo      | Areia Regeneração Macharia   | 1  | M. Bruta | 40,81              | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 12,64  | 379,63  | < 2,20 | 2,36   | 12,4  | 6,85 |
| 39.804      | Processo      | Areia Regeneração Macharia   | 2  | M. Bruta | 41,32              | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 14,44  | 368,96  | < 2,20 | 2,84   | 12,3  | 7,94 |
| 39.807      | Processo      | Areia Regeneração Macharia   | 3  | M. Bruta | 42,55              | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 14,11  | 350,2   | < 2,20 | 2,8    | 12,3  | 7,31 |
| 39.819      | Processo      | Mistura de Areia de Macharia | 1  | M. Bruta | 191,57             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 9,58   | 29,26   | < 2,20 | 0,8    | 0,4   | 6,29 |
| 39.822      | Processo      | Mistura de Areia de Macharia | 2  | M. Bruta | 181,76             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 10,34  | 28,5    | < 2,20 | 0,67   | 0,3   | 6,14 |
| 39.825      | Processo      | Mistura de Areia de Macharia | 3  | M. Bruta | 173,58             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 9,3    | 24,19   | < 2,20 | 0,79   | 0,3   | 6,23 |
| 39.855      | Processo      | Areia de Sistema de Moldagem | 1  | M. Bruta | 959,69             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,67   | 759,56  | < 2,20 | 13,27  | 12,4  | 8,74 |
| 39.858      | Processo      | Areia de Sistema de Moldagem | 2  | M. Bruta | 985,02             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,766  | 853,86  | < 2,20 | 15,22  | 11,7  | 8,80 |
| 39.861      | Processo      | Areia de Sistema de Moldagem | 3  | M. Bruta | 967,43             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,738  | 802,83  | < 2,20 | 13,07  | 12    | 8,65 |
| 39.874      | Processo      | Areia Regeneração Moldagem   | 1  | M. Bruta | 746,67             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,579  | 545,39  | < 2,20 | 9,85   | 7,9   | 7,78 |
| 39.877      | Processo      | Areia Regeneração Moldagem   | 2  | M. Bruta | 762,57             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,592  | 624,11  | < 2,20 | 10,2   | 8,4   | 7,81 |
| 39.880      | Processo      | Areia Regeneração Moldagem   | 3  | M. Bruta | 646,88             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,738  | 589,64  | < 2,20 | 11,4   | 7,7   | 7,73 |
| 39.883      | Processo      | Areia Desmoldagem            | 1  | M. Bruta | 1491,35            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,574  | 1137,46 | < 2,20 | 16,29  | 1,9   | 8,71 |
| 39.886      | Processo      | Areia Desmoldagem            | 2  | M. Bruta | 1525,47            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,542  | 1091,52 | < 2,20 | 15,24  | 2,1   | 8,69 |
| 39.889      | Processo      | Areia Desmoldagem            | 3  | M. Bruta | 1422,99            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,592  | 1105,78 | < 2,20 | 15,36  | 1,9   | 8,32 |
| 39.792      | Resíduo       | Resíduo Areia de Macharia    | 1  | M. Bruta | 446,30             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,343  | 161,71  | < 2,20 | 0,12   | 4,6   | 6,55 |
| 39.795      | Resíduo       | Resíduo Areia de Macharia    | 2  | M. Bruta | 416,73             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,312  | 161,49  | < 2,20 | 0,12   | 4,8   | 7,37 |
| 39.798      | Resíduo       | Resíduo Areia de Macharia    | 3  | M. Bruta | 404,67             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,46   | 159,38  | < 2,20 | 0,12   | 5,2   | 7,51 |
| 39.846      | Resíduo       | Resíduo Areia de Moldagem    | 1  | M. Bruta | 1468,43            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 1,278  | 1203,32 | < 2,20 | 15,19  | 6,6   | 8,28 |
| 39.849      | Resíduo       | Resíduo Areia de Moldagem    | 2  | M. Bruta | 1498,10            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,957  | 1268,98 | < 2,20 | 16,96  | 6,9   | 8,35 |
| 39.852      | Resíduo       | Resíduo Areia de Moldagem    | 3  | M. Bruta | 1483,45            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,959  | 1239,47 | < 2,20 | 16,62  | 6,5   | 8,41 |
| 39.865      | Resíduo       | Resíduo de Quebra de Canal   | 1  | M. Bruta | 967,71             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,333  | 1049,18 | < 2,20 | 13,38  | 11,4  | 6,54 |
| 39.868      | Resíduo       | Resíduo de Quebra de Canal   | 2  | M. Bruta | 995,60             | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,404  | 1078,55 | < 2,20 | 12,82  | 11,2  | 6,58 |
| 39.871      | Resíduo       | Resíduo de Quebra de Canal   | 3  | M. Bruta | 1002,99            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 0,397  | 1096,67 | < 2,20 | 13,26  | 11,5  | 6,74 |
| 39.912      | Resíduo       | Resíduo Pó de Exaustão       | 1  | M. Bruta | 1232,50            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 24,93  | 1870,30 | 5,9    | 25,84  | 620,2 | 8,40 |
| 39.916      | Resíduo       | Resíduo Pó de Exaustão       | 2  | M. Bruta | 1184,60            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 22,128 | 1874,45 | 7,41   | 25,96  | 599,6 | 8,31 |
| 39.919      | Resíduo       | Resíduo Pó de Exaustão       | 3  | M. Bruta | 1183,83            | < 5,000 | < 0,025 | < 0,25 | < 0,750 | 23,968 | 1814,81 | 4,73   | 26,14  | 603,3 | 8,20 |

### 1.3 Resultados das Análises de Extrato Solubilizado das amostras do Ciclo de vida das Areias Descartadas de Fundição

| Limite de Quantificação |               |                              |    |              | 0,100             | 0,200  | 0,001   | 0,010  | 0,030   | 0,025   | 0,025   | 0,100 | 0,005   | 0,010  | -    |
|-------------------------|---------------|------------------------------|----|--------------|-------------------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|-------|---------|--------|------|
| Informações             |               |                              |    |              | Resultados (mg/L) |        |         |        |         |         |         |       |         |        | pH   |
| Laudo                   | Tipo          | Amostra                      | n° | Análise      | Al                | Ba     | Cd      | Pb     | Cr      | Fenol   | Fe      | F     | Mn      | Zn     |      |
| 39.782                  | Matéria-prima | Bentonita Sódica Natural     | 1  | Solubilizado | 0,57              | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,458 | 0,323   | 0,179  | 6,21 |
| 39.785                  | Matéria-prima | Bentonita Sódica Natural     | 2  | Solubilizado | 0,53              | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,468 | 0,279   | 0,156  | 6,26 |
| 39.788                  | Matéria-prima | Bentonita Sódica Natural     | 3  | Solubilizado | 0,39              | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,391 | 0,304   | 0,144  | 6,35 |
| 39.809                  | Matéria-prima | Bentonita Ativada            | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,879 | < 0,005 | 0,022  | 7,42 |
| 39.812                  | Matéria-prima | Bentonita Ativada            | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 1,014 | < 0,005 | 0,019  | 8,83 |
| 39.815                  | Matéria-prima | Bentonita Ativada            | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,814 | < 0,005 | 0,024  | 8,72 |
| 39.827                  | Matéria-prima | Areia Base                   | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,629 | < 0,005 | < 0,01 | 6,96 |
| 39.830                  | Matéria-prima | Areia Base                   | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,629 | < 0,005 | < 0,01 | 6,98 |
| 39.833                  | Matéria-prima | Areia Base                   | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,608 | < 0,005 | < 0,01 | 6,96 |
| 39.836                  | Matéria-prima | Bent. Sód. Ativ + Nat.       | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 1,058 | < 0,005 | < 0,01 | 8,11 |
| 39.839                  | Matéria-prima | Bent. Sód. Ativ + Nat.       | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,979 | < 0,005 | < 0,01 | 8,27 |
| 39.842                  | Matéria-prima | Bent. Sód. Ativ + Nat.       | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,81  | < 0,005 | < 0,01 | 8,42 |
| 39.891                  | Matéria-prima | Pó de Carvão Aditivo         | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,075   | 3,571   | 3,929 | 0,735   | 0,096  | 4,3  |
| 39.895                  | Matéria-prima | Pó de Carvão Aditivo         | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,072   | 3,612   | 3,949 | 0,749   | 0,109  | 4,45 |
| 39.898                  | Matéria-prima | Pó de Carvão Aditivo         | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,075   | 3,588   | 3,951 | 0,771   | 0,126  | 4,38 |
| 39.901                  | Matéria-prima | Pó de Carvão                 | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,734 | 0,059   | < 0,01 | 7,41 |
| 39.904                  | Matéria-prima | Pó de Carvão                 | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,73  | 0,062   | < 0,01 | 7,56 |
| 39.907                  | Matéria-prima | Pó de Carvão                 | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,769 | 0,072   | < 0,01 | 7,49 |
| 39.800                  | Processo      | Areia Regeneração Macharia   | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,29    | 0,101   | 0,78  | < 0,005 | 0,178  | 6,72 |
| 39.803                  | Processo      | Areia Regeneração Macharia   | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,3     | 0,101   | 0,765 | < 0,005 | 0,151  | 6,91 |
| 39.806                  | Processo      | Areia Regeneração Macharia   | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,29    | 0,139   | 0,861 | < 0,005 | 0,168  | 6,88 |
| 39.818                  | Processo      | Mistura de Areia de Macharia | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 6,2     | < 0,025 | < 0,1 | < 0,005 | < 0,01 | 4,98 |
| 39.821                  | Processo      | Mistura de Areia de Macharia | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 6,5     | < 0,025 | < 0,1 | < 0,005 | < 0,01 | 4,86 |
| 39.824                  | Processo      | Mistura de Areia de Macharia | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 6,74    | < 0,025 | < 0,1 | < 0,005 | < 0,01 | 4,83 |
| 39.854                  | Processo      | Areia de Sistema de Moldagem | 1  | Solubilizado | 101,90            | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 51,108  | 0,785 | 0,034   | 0,129  | 7,36 |
| 39.857                  | Processo      | Areia de Sistema de Moldagem | 2  | Solubilizado | 113,29            | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 50,919  | 0,775 | 0,024   | 0,124  | 7,27 |
| 39.860                  | Processo      | Areia de Sistema de Moldagem | 3  | Solubilizado | 104,25            | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 50,564  | 0,748 | 0,036   | 0,146  | 7,39 |
| 39.873                  | Processo      | Areia Regeneração Moldagem   | 1  | Solubilizado | 5,08              | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 4,617   | 0,932 | < 0,005 | < 0,01 | 7,41 |
| 39.876                  | Processo      | Areia Regeneração Moldagem   | 2  | Solubilizado | 5,55              | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 4,568   | 0,916 | < 0,005 | < 0,01 | 7,28 |
| 39.879                  | Processo      | Areia Regeneração Moldagem   | 3  | Solubilizado | 4,96              | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 4,691   | 0,928 | < 0,005 | < 0,01 | 7,33 |
| 39.882                  | Processo      | Areia Desmoldagem            | 1  | Solubilizado | 59,07             | 0,25   | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 40,826  | 0,853 | 0,071   | 0,182  | 7,71 |
| 39.885                  | Processo      | Areia Desmoldagem            | 2  | Solubilizado | 62,76             | 0,3    | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 38,658  | 0,868 | 0,06    | 0,175  | 7,53 |
| 39.888                  | Processo      | Areia Desmoldagem            | 3  | Solubilizado | 64,62             | 0,3    | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 40,447  | 0,859 | 0,078   | 0,182  | 7,66 |
| 39.791                  | Resíduo       | Resíduo Areia de Macharia    | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 0,257   | 0,783 | < 0,005 | 0,042  | 7,22 |
| 39.794                  | Resíduo       | Resíduo Areia de Macharia    | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 0,309   | 0,827 | < 0,005 | 0,049  | 7,08 |
| 39.797                  | Resíduo       | Resíduo Areia de Macharia    | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 0,305   | 0,780 | < 0,005 | 0,058  | 7,13 |
| 39.845                  | Resíduo       | Resíduo Areia de Moldagem    | 1  | Solubilizado | 102,52            | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,055   | 51,129  | 0,781 | 0,158   | 0,175  | 7,17 |
| 39.848                  | Resíduo       | Resíduo Areia de Moldagem    | 2  | Solubilizado | 105,53            | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,054   | 51,084  | 0,762 | 0,151   | 0,178  | 7,19 |
| 39.851                  | Resíduo       | Resíduo Areia de Moldagem    | 3  | Solubilizado | 106,29            | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,056   | 51,047  | 0,800 | 0,142   | 0,214  | 7,19 |
| 39.864                  | Resíduo       | Resíduo de Quebra de Canal   | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,828 | < 0,005 | < 0,01 | 7,13 |
| 39.867                  | Resíduo       | Resíduo de Quebra de Canal   | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 0,849 | < 0,005 | < 0,01 | 7,18 |
| 39.870                  | Resíduo       | Resíduo de Quebra de Canal   | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | 1,474 | < 0,005 | < 0,01 | 7,03 |
| 39.911                  | Resíduo       | Resíduo Pó de Exaustão       | 1  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 3,27    | 0,123   | 1,383 | 0,368   | 0,329  | 7,57 |
| 39.915                  | Resíduo       | Resíduo Pó de Exaustão       | 2  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 3,22    | 0,124   | 1,405 | 0,366   | 0,325  | 7,46 |
| 39.918                  | Resíduo       | Resíduo Pó de Exaustão       | 3  | Solubilizado | < 0,100           | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 3,65    | 0,175   | 1,394 | 0,387   | 0,343  | 7,43 |

#### 1.4 Resultados das Análises de Lixiviado das amostras do Ciclo de vida das Areias Descartadas de Fundição

| Informações |               |                              |    | Limite de Quantificação |        |        |         |        |         |         |         |         |         |         |                     |
|-------------|---------------|------------------------------|----|-------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------|
| Laudo       | Tipo          | Amostra                      | n° | Análise                 | 0,100  | 0,200  | 0,001   | 0,010  | 0,030   | 0,025   | 0,025   | 0,100   | 0,005   | 0,010   | -                   |
|             |               |                              |    | Resultados (mg/L)       |        |        |         |        |         |         |         |         |         |         | pH <sub>iníc.</sub> |
|             |               |                              |    | Al                      | Ba     | Cd     | Pb      | Cr     | Fenol   | Fe      | F       | Mn      | Zn      |         |                     |
| 39.781      | Matéria-prima | Bentonita Sódica Natural     | 1  | Lixiviado               | 1,30   | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | < 0,100 | 0,636   | 0,082   | 3,92                |
| 39.784      | Matéria-prima | Bentonita Sódica Natural     | 2  | Lixiviado               | 0,95   | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | < 0,100 | 0,674   | 0,095   | 3,86                |
| 39.787      | Matéria-prima | Bentonita Sódica Natural     | 3  | Lixiviado               | 1,11   | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | < 0,100 | 0,699   | 0,076   | 3,92                |
| 39.808      | Matéria-prima | Bentonita Ativada            | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,076   | < 0,025 | < 0,100 | 0,35    | < 0,010 | 4,31                |
| 39.811      | Matéria-prima | Bentonita Ativada            | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,064   | < 0,025 | < 0,100 | 0,322   | < 0,010 | 4,33                |
| 39.814      | Matéria-prima | Bentonita Ativada            | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,068   | < 0,025 | < 0,100 | 0,383   | < 0,010 | 4,33                |
| 39.826      | Matéria-prima | Areia Base                   | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,037   | < 0,025 | < 0,100 | < 0,005 | 0,026   | 3,92                |
| 39.829      | Matéria-prima | Areia Base                   | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,031   | < 0,025 | < 0,100 | < 0,005 | 0,021   | 3,95                |
| 39.832      | Matéria-prima | Areia Base                   | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,034   | < 0,025 | < 0,100 | < 0,005 | 0,034   | 3,96                |
| 39.835      | Matéria-prima | Bent. Sód. Ativ + Nat.       | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,031   | < 0,025 | < 0,100 | 0,448   | 0,105   | 3,88                |
| 39.838      | Matéria-prima | Bent. Sód. Ativ + Nat.       | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,031   | < 0,025 | < 0,100 | 0,437   | 0,08    | 3,93                |
| 39.841      | Matéria-prima | Bent. Sód. Ativ + Nat.       | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,031   | < 0,025 | < 0,100 | 0,432   | 0,116   | 3,82                |
| 39.890      | Matéria-prima | Pó de Carvão Aditivo         | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | < 0,100 | 0,014   | 0,053   | 3,97                |
| 39.894      | Matéria-prima | Pó de Carvão Aditivo         | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | < 0,100 | 0,017   | 0,042   | 4,00                |
| 39.897      | Matéria-prima | Pó de Carvão Aditivo         | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | < 0,025 | < 0,100 | 0,018   | 0,057   | 3,95                |
| 39.900      | Matéria-prima | Pó de Carvão                 | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,046   | < 0,025 | < 0,100 | 0,661   | 0,208   | 3,99                |
| 39.903      | Matéria-prima | Pó de Carvão                 | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,041   | < 0,025 | < 0,100 | 0,733   | 0,213   | 4,00                |
| 39.906      | Matéria-prima | Pó de Carvão                 | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,046   | < 0,025 | < 0,100 | 0,754   | 0,221   | 3,99                |
| 39.799      | Processo      | Areia Regeneração Macharia   | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 5,230   | 9,427   | < 0,100 | < 0,005 | 0,585   | 3,88                |
| 39.802      | Processo      | Areia Regeneração Macharia   | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 5,280   | 8,81    | < 0,100 | < 0,005 | 0,617   | 3,9                 |
| 39.805      | Processo      | Areia Regeneração Macharia   | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 5,300   | 9,545   | < 0,100 | < 0,005 | 0,58    | 3,89                |
| 39.817      | Processo      | Mistura de Areia de Macharia | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 7,900   | < 0,025 | < 0,100 | < 0,005 | 0,058   | 3,95                |
| 39.820      | Processo      | Mistura de Areia de Macharia | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 7,820   | < 0,025 | < 0,100 | < 0,005 | 0,064   | 3,92                |
| 39.823      | Processo      | Mistura de Areia de Macharia | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 7,800   | < 0,025 | < 0,100 | < 0,005 | 0,06    | 3,91                |
| 39.853      | Processo      | Areia de Sistema de Moldagem | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 0,775   | < 0,100 | 0,118   | 0,123   | 3,97                |
| 39.856      | Processo      | Areia de Sistema de Moldagem | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 0,763   | < 0,100 | 0,099   | 0,137   | 3,98                |
| 39.859      | Processo      | Areia de Sistema de Moldagem | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 0,563   | < 0,100 | 0,101   | 0,136   | 3,93                |
| 39.872      | Processo      | Areia Regeneração Moldagem   | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,062   | 0,318   | < 0,100 | 0,228   | 0,117   | 4,00                |
| 39.875      | Processo      | Areia Regeneração Moldagem   | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,076   | 0,391   | < 0,100 | 0,21    | 0,142   | 3,98                |
| 39.878      | Processo      | Areia Regeneração Moldagem   | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,075   | 0,269   | < 0,100 | 0,229   | 0,15    | 4,00                |
| 39.881      | Processo      | Areia Desmoldagem            | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,057   | 0,575   | < 0,100 | 0,129   | 0,113   | 4,00                |
| 39.884      | Processo      | Areia Desmoldagem            | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,055   | 0,565   | < 0,100 | 0,114   | 0,1     | 3,99                |
| 39.887      | Processo      | Areia Desmoldagem            | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,058   | 0,533   | < 0,100 | 0,135   | 0,132   | 3,97                |
| 39.790      | Resíduo       | Resíduo Areia de Macharia    | 1  | Lixiviado               | 0,96   | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,074   | 0,765   | 0,148   | < 0,005 | 0,144   | 3,81                |
| 39.793      | Resíduo       | Resíduo Areia de Macharia    | 2  | Lixiviado               | 0,83   | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,074   | 0,726   | 0,225   | < 0,005 | 0,105   | 3,78                |
| 39.796      | Resíduo       | Resíduo Areia de Macharia    | 3  | Lixiviado               | 1,18   | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,075   | 0,746   | 0,183   | < 0,005 | 0,134   | 3,80                |
| 39.844      | Resíduo       | Resíduo Areia de Moldagem    | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 0,677   | < 0,100 | 0,119   | 0,081   | 3,99                |
| 39.847      | Resíduo       | Resíduo Areia de Moldagem    | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 0,674   | < 0,100 | 0,128   | 0,074   | 4,00                |
| 39.850      | Resíduo       | Resíduo Areia de Moldagem    | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | < 0,025 | 0,7     | < 0,100 | 0,143   | 0,081   | 4,01                |
| 39.863      | Resíduo       | Resíduo de Quebra de Canal   | 1  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,095   | 4,816   | < 0,100 | 0,129   | 0,404   | 3,92                |
| 39.866      | Resíduo       | Resíduo de Quebra de Canal   | 2  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,093   | 5,054   | < 0,100 | 0,112   | 0,423   | 3,95                |
| 39.869      | Resíduo       | Resíduo de Quebra de Canal   | 3  | Lixiviado               | < 0,10 | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 0,091   | 5,047   | < 0,100 | 0,122   | 0,453   | 3,99                |
| 39.910      | Resíduo       | Resíduo Pó de Exaustão       | 1  | Lixiviado               | 1,49   | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 4,000   | 7,514   | < 0,100 | 0,972   | 17,251  | 4,00                |
| 39.914      | Resíduo       | Resíduo Pó de Exaustão       | 2  | Lixiviado               | 1,25   | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 4,270   | 7,375   | < 0,100 | 0,986   | 17,292  | 4,03                |
| 39.917      | Resíduo       | Resíduo Pó de Exaustão       | 3  | Lixiviado               | 1,73   | < 0,20 | < 0,001 | < 0,01 | < 0,030 | 4,170   | 7,477   | < 0,100 | 1,056   | 17,006  | 4,00                |

### 1.5 Resultados das Análises Risco à Saúde Humana das Amostras de Resíduo do Ciclo de vida das Areias Descartadas de Fundição

| Massa Bruta | Risco Carcinogênico de Valores de Ensaio de Massa Bruta de ADF      |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|             | Vias inalação, ingestão, contato dérmico para o cenário residencial |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Elemento    | AB  | PCA      | BA       | BSAN     | BSN      | PC       | AD       | ARMAC    | ARMOL    | ASM      | MAM      | RAMAC    | RAMOL    | RPE      | RQC      |
| Alumínio    | NE  | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       |
| Bário       | NE  | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       |
| Cádmio      | 1,40E-11  | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 | 1,40E-11 |
| Cromo       | 2,70E-09  | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 | 2,70E-09 |
| Fenol       | NE  | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       |
| Ferro       | NE  | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       |
| Fluoretos   | NE  | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       |
| Manganês    | NE  | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       | NE       |

| Massa Bruta | Risco Não Carcinogênico de Valores de Ensaio de Massa Bruta de ADF  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|             | Vias inalação, ingestão, contato dérmico para o cenário residencial |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Elemento    | AB  | PCA      | BA       | BSAN     | BSN      | PC       | AD       | ARMAC    | ARMOL    | ASM      | MAM      | RAMAC    | RAMOL    | RPE      | RQC      |
| Alumínio    | 5,40E-04  | 5,60E-06 | 8,90E-04 | 3,70E-03 | 9,50E-04 | 5,60E-06 | 1,70E-03 | 9,50E-05 | 1,70E-03 | 2,20E-03 | 4,30E-04 | 1,00E-03 | 3,40E-03 | 2,80E-03 | 2,20E-03 |
| Bário       | 6,70E-05  | 6,70E-05 | 6,70E-05 | 8,00E-04 | 6,70E-05 |
| Cádmio      | 2,20E-04  | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 | 2,20E-04 |
| Cromo       | 1,30E-03  | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 | 1,30E-03 |
| Fenol       | 1,70E-06  | 2,50E-06 | 1,60E-06 | 4,30E-06 | 2,10E-06 | 2,10E-06 | 5,40E-06 | 1,00E-04 | 5,40E-06 | 5,60E-06 | 7,50E-05 | 3,30E-06 | 9,30E-06 | 1,80E-04 | 2,90E-06 |
| Ferro       | 1,60E-04  | 5,10E-04 | 9,00E-04 | 4,40E-03 | 8,80E-04 | 6,80E-04 | 2,20E-03 | 1,40E-03 | 2,20E-03 | 3,00E-03 | 1,00E-04 | 5,80E-04 | 4,50E-03 | 6,70E-03 | 3,90E-03 |
| Fluoretos   | 5,30E-05  | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 | 5,30E-05 |
| Manganês    | 9,10E-05  | 5,80E-04 | 4,60E-03 | 9,50E-03 | 4,00E-03 | 7,40E-04 | 9,50E-04 | 2,40E-04 | 9,50E-04 | 1,30E-03 | 6,70E-05 | 1,00E-05 | 1,40E-03 | 2,20E-03 | 1,10E-03 |

Legenda: NE – Não Evidenciado, AB – Areia Base, PCA – Pó de Carvão Aditivado, BA – Bentonita Sódica Ativada, BSAN – Bentonita Sódica Ativada + Bentonita Sódica Natural, BSN – Bentonita Sódica Natural, PC- Pó de Carvão, AD – Areia da Desmoldagem, ARMAC – Areia da Regeneração da Macharia, ARMOL – Areia da Regeneração da Moldagem, ASM – Areia do Sistema da Moldagem, MAM – Mistura de Areia da Macharia, RAMAC – Resíduo de Areia da Macharia, RAMOL – Resíduo de Areia da Moldagem, RPE – Resíduo de Pó da Exaustão, RQC- Resíduo da Quebra de Canais.

Continua na próxima página.

| Lixiviado        | Risco Não Carcinogênico de Valores de Ensaio de Lixiviação de ADF   |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  | Vias inalação, ingestão, contato dérmico para o cenário residencial |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <i>Elemento</i>  | AB  | PCA      | BA       | BSAN     | BSN      | PC       | AD       | ARMAC    | ARMOL    | ASM      | MAM      | RAMAC    | RAMOL    | RPE      | RQC      |
| <b>Alumínio</b>  | 2,80E-03  | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 3,60E-02 | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 3,30E-02 | 2,80E-03 | 4,80E-02 | 2,80E-03 |
| <b>Bário</b>     | 2,80E-02  | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 |
| <b>Cádmio</b>    | 6,50E-02  | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 |
| <b>Fenol</b>     | 3,40E-03  | 2,30E-03 | 7,00E-03 | 2,90E-03 | 2,30E-03 | 4,30E-03 | 5,40E-03 | 4,90E-01 | 7,00E-03 | 2,30E-03 | 7,30E-01 | 6,90E-03 | 2,30E-03 | 3,90E-01 | 8,80E-03 |
| <b>Ferro</b>     | 1,00E-03  | 1,00E-03 | 1,00E-03 | 1,00E-03 | 1,00E-03 | 1,00E-03 | 2,30E-02 | 3,80E-01 | 1,60E-02 | 3,10E-02 | 1,00E-03 | 3,10E-02 | 2,80E-02 | 3,00E-01 | 2,00E-01 |
| <b>Fluoretos</b> | 4,60E-02  | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 1,00E-01 | 4,60E-02 | 4,60E-02 | 4,60E-02 |
| <b>Manganês</b>  | 3,10E-03  | 1,10E-02 | 2,40E-01 | 2,80E-01 | 4,40E-01 | 4,70E-01 | 8,40E-02 | 3,10E-03 | 1,40E-01 | 7,40E-02 | 3,10E-03 | 3,10E-03 | 8,90E-02 | 6,60E-01 | 8,10E-02 |

| Solubilizado     | Risco Não Carcinogênico de Valores de Ensaio de Solubilização de ADF |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  | Vias inalação, ingestão, contato dérmico para o cenário residencial  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <i>Elemento</i>  | AB   | APCA     | BA       | BSAN     | BSN      | PC       | AD       | ARMAC    | ARMOL    | ASM      | MAM      | RAMAC    | RAMOL    | RPE      | RQC      |
| <b>Alumínio</b>  | 2,80E-03   | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 1,60E-02 | 2,80E-03 | 1,80E+00 | 2,80E-03 | 1,50E-01 | 3,20E+00 | 2,80E-03 | 2,80E-03 | 3,00E+00 | 2,80E-03 | 2,80E-03 |
| <b>Bário</b>     | 2,80E-02   | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 2,80E-02 | 4,20E-02 | 2,80E-02 |
| <b>Cádmio</b>    | 6,50E-02   | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 | 6,50E-02 |
| <b>Fenol</b>     | 2,30E-03   | 6,90E-03 | 2,30E-03 | 2,30E-03 | 2,30E-03 | 2,30E-03 | 2,30E-03 | 2,80E-02 | 2,30E-03 | 2,30E-03 | 6,20E-01 | 2,30E-03 | 5,20E-03 | 3,40E-01 | 2,30E-03 |
| <b>Ferro</b>     | 1,00E-03   | 1,50E-01 | 1,00E-03 | 1,00E-03 | 1,00E-03 | 1,00E-03 | 1,60E+00 | 5,60E-03 | 1,90E-01 | 2,10E+00 | 1,00E-03 | 1,20E-02 | 2,10E+00 | 7,10E-03 | 1,00E-03 |
| <b>Fluoretos</b> | 2,90E-01   | 1,80E+00 | 4,60E-01 | 4,80E-01 | 2,10E-01 | 3,50E-01 | 4,00E-01 | 3,90E-01 | 4,30E-01 | 3,60E-01 | 4,60E-02 | 3,80E-01 | 3,70E-01 | 6,40E-01 | 6,70E-01 |
| <b>Manganês</b>  | 3,10E-03   | 4,80E-01 | 3,10E-03 | 3,10E-03 | 2,00E-01 | 4,50E-02 | 4,90E-02 | 3,10E-03 | 3,10E-03 | 2,20E-02 | 3,10E-03 | 3,10E-03 | 9,90E-02 | 2,40E-01 | 3,10E-03 |

Legenda: AB – Areia Base, PCA – Pó de Carvão Aditivado, BA – Bentonita Sódica Ativada, BSAN – Bentonita Sódica Ativada + Bentonita Sódica Natural, BSN – Bentonita Sódica Natural, PC- Pó de Carvão, AD – Areia da Desmoldagem, ARMAC – Areia da Regeneração da Macharia, ARMOL – Areia da Regeneração da Moldagem, ASM – Areia do Sistema da Moldagem, MAM – Mistura de Areia da Macharia, RAMAC – Resíduo de Areia da Macharia, RAMOL – Resíduo de Areia da Moldagem, RPE – Resíduo de Pó da Exaustão, RQC- Resíduo da Quebra de Canais

### 1.6 Resultados das Análises Risco Ecológico das Matérias Primas do Ciclo de vida das Areias Descartadas de Fundição

|   | MASSA BRUTA |       |            | SOLUBILIZADO |            | LIXIVIADO |            |
|---|-------------|-------|------------|--------------|------------|-----------|------------|
|   | PARÂMETRO   | EPAR6 | CONAMA 420 | EPAR6        | CONAMA 420 | EPAR6     | CONAMA 420 |
| AREIA BASE                                  | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|   | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|   | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
| PÓ DE CARVÃO ATIVADO                        | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|   | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Ferro       | ND    | ND         | AR           | AR         | SR        | SR         |
|   | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|   | Manganês    | ND    | ND         | AR           | AR         | SR        | SR         |
| BENTONITA SÓDICA ATIVADA                    | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|   | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|   | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | AR        | SR         |
| BENTONITA SÓDICA ATIVADA + BENTONITA SÓDICA | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Bário       | AR    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|   | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|   | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | AR        | SR         |
| BENTONITA SÓDICA NATURAL                    | Alumínio    | ND    | ND         | AR           | SR         | AR        | SR         |
|   | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|   | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|   | Manganês    | ND    | ND         | AR           | SR         | AR        | SR         |
| PÓ DE CARVÃO                                | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|   | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|   | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|   | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|   | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | AR        | SR         |

Legenda:ND – Não Disponível / NV – Não Verificado / SR – Sem Risco / AR – Apresentou Risco.

### 1.7 Resultados das Análises Risco Ecológico das Amostras do Processo do Ciclo de vida das Areias Descartadas de Fundição

|                              | MASSA BRUTA |       |            | SOLUBILIZADO |            | LIXIVIADO |            |
|------------------------------|-------------|-------|------------|--------------|------------|-----------|------------|
|                              | PARÂMETRO   | EPAR6 | CONAMA 420 | EPAR6        | CONAMA 420 | EPAR6     | CONAMA 420 |
| AREIA DA DESMOLDAGEM         | Alumínio    | ND    | ND         | AR           | AR         | AR        | SR         |
|                              | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | AR        | SR         |
|                              | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | AR        | SR         |
|                              | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | AR        | SR         |
|                              | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Ferro       | ND    | ND         | AR           | AR         | SR        | SR         |
|                              | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|                              | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | AR        | SR         |
| AREIA REGENERADA DE MACHARIA | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|                              | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fenol       | SR    | AR         | AR           | AR         | AR        | SR         |
|                              | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | AR        | SR         |
|                              | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|                              | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
| AREIA RECUPERADA MOLDAGEM    | Alumínio    | ND    | ND         | AR           | AR         | NV        | SR         |
|                              | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|                              | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Ferro       | ND    | ND         | AR           | AR         | SR        | SR         |
|                              | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|                              | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | AR        | SR         |
| AREIA À VERDE (SISTEMA)      | Alumínio    | ND    | ND         | AR           | AR         | NV        | SR         |
|                              | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|                              | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Ferro       | ND    | ND         | AR           | AR         | SR        | SR         |
|                              | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|                              | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
| AREIA DE MACHARIA            | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|                              | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fenol       | SR    | AR         | AR           | AR         | AR        | SR         |
|                              | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|                              | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |

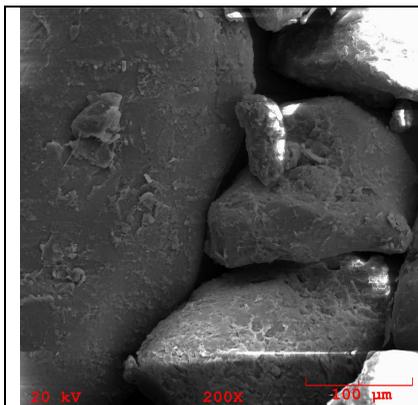
ND – Não Disponível / NV – Não Verificado / SR – Sem Risco / AR – Apresentou Risco.

### 1.8 Resultados das Análises Risco Ecológico das Amostras de Resíduo do Ciclo de vida das Areias Descartadas de Fundição

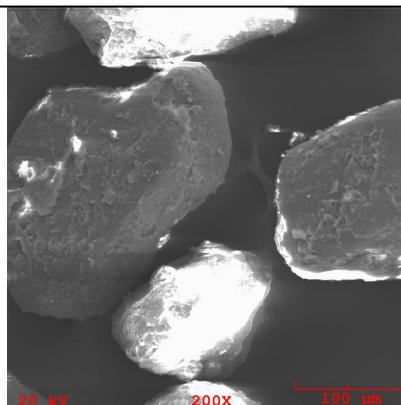
|                              | MASSA BRUTA |       |            | SOLUBILIZADO |            | LIXIVIADO |            |
|------------------------------|-------------|-------|------------|--------------|------------|-----------|------------|
|                              | PARÂMETRO   | EPAR6 | CONAMA 420 | EPAR6        | CONAMA 420 | EPAR6     | CONAMA 420 |
| RESÍDUO DE AREIA DE MACHARIA | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | AR        | SR         |
|                              | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|                              | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|                              | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | SR        | SR         |
| RESÍDUO DE AREIA DE MOLDAGEM | Alumínio    | ND    | ND         | AR           | AR         | NV        | SR         |
|                              | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|                              | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Ferro       | ND    | ND         | AR           | AR         | SR        | SR         |
|                              | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|                              | Manganês    | ND    | ND         | AR           | SR         | AR        | SR         |
| PÓ DA EXAUSTÃO DA MOLDAGEM   | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | AR        | SR         |
|                              | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|                              | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fenol       | SR    | AR         | AR           | AR         | AR        | SR         |
|                              | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | AR        | SR         |
|                              | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|                              | Manganês    | ND    | ND         | AR           | SR         | AR        | SR         |
| RESÍDUO DE QUEBRA DE CANAL   | Alumínio    | ND    | ND         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Bário       | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Cádmio      | NV    | SR         | NV           | SR         | NV        | SR         |
|                              | Chumbo      | NV    | SR         | NV           | NV         | NV        | SR         |
|                              | Cromo       | NV    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Fenol       | SR    | SR         | SR           | SR         | SR        | SR         |
|                              | Ferro       | ND    | ND         | SR           | SR         | AR        | SR         |
|                              | Fluoretos   | ND    | ND         | ND           | ND         | ND        | ND         |
|                              | Manganês    | ND    | ND         | SR           | SR         | AR        | SR         |

ND – Não Disponível / NV – Não Verificado / SR – Sem Risco / AR – Apresentou Risco.

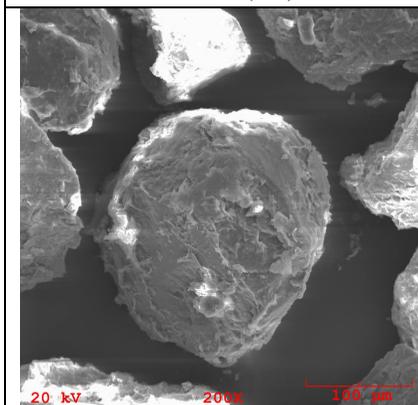
**2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE AREAIS  
DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO COM DIFERENTES TEORES DE  
BENTONITA**



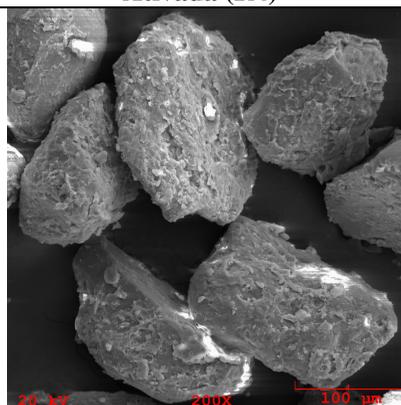
**2.1 Amostra de ADF contendo  
4% de Bentonita Sódica Ativada  
Natural (R3)**



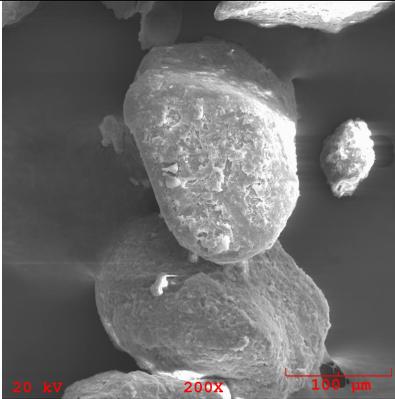
**2.2 Amostra de ADF contendo  
4% de Bentonita Sódica  
Ativada (R4)**



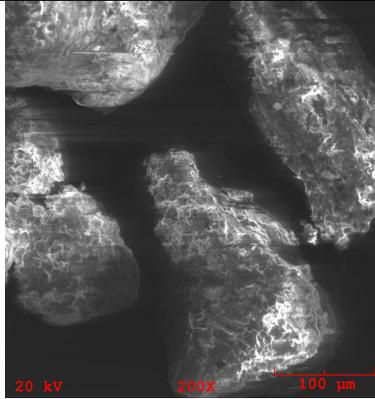
**2.3 Amostra de ADF contendo  
8% de Bentonita Sódica Natural  
(R1)**



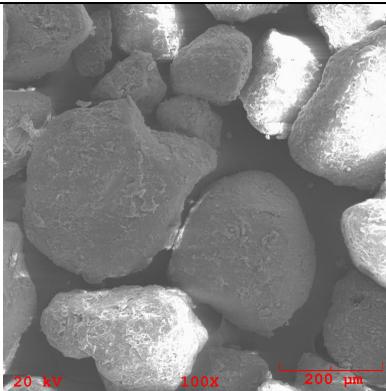
**2.4 Amostra de ADF contendo  
8% de Bentonita Sódica  
Ativada (R5)**



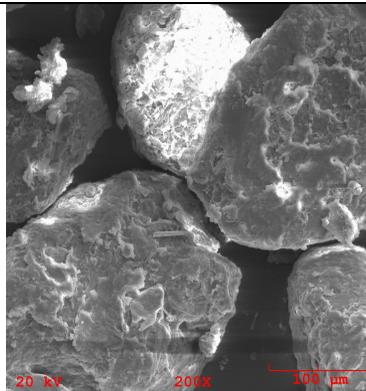
**2.5 Amostra de ADF contendo 4% de Bentonita Sódica Natural e 4% Bentonita Sódica Ativada (R7)**



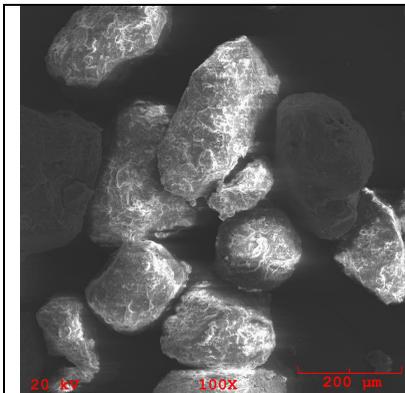
**2.6 Amostra de ADF contendo 8% de Bentonita Sódica Natural e 4% Bentonita Sódica Ativada (R8)**



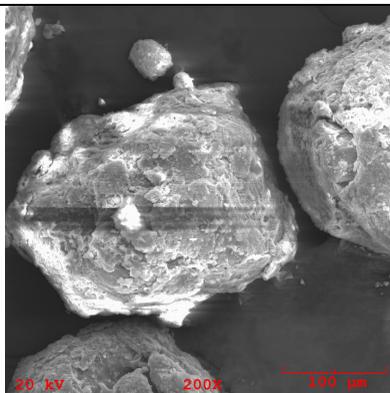
**2.7 Amostra de ADF contendo 4% de Bentonita Sódica Natural e 8% Bentonita Sódica Ativada (R9)**



**2.8 Amostra de ADF contendo 15% de Bentonita Sódica Ativada Natural (R2)**



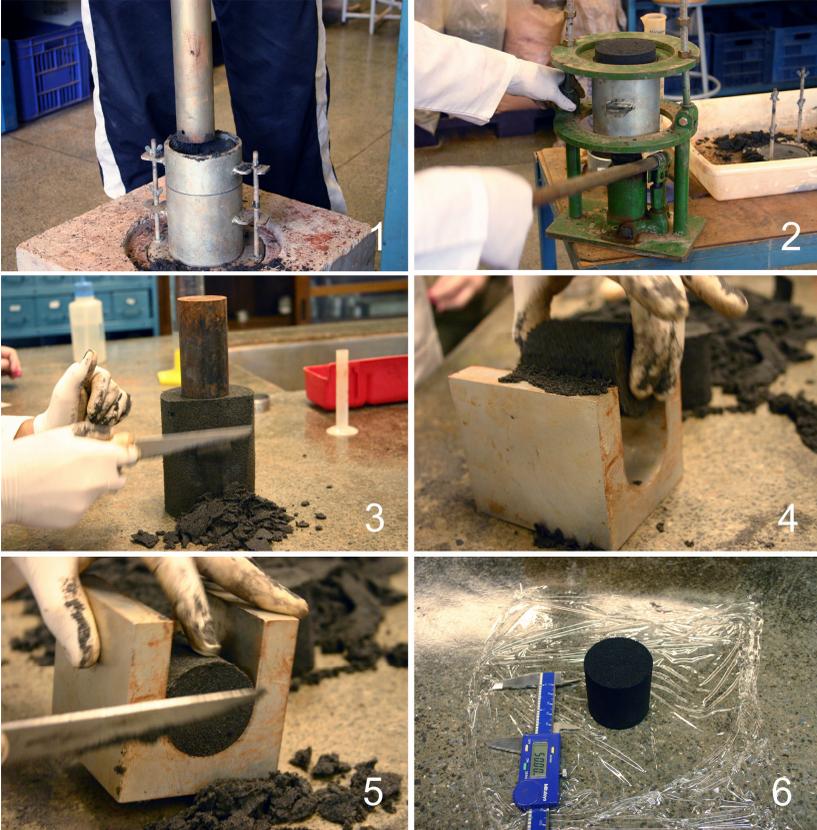
**2.9 Amostra de ADF contendo  
15% de Bentonita Sódica  
Ativada (R6)**



**2.10 Amostra de ADF contendo  
6,5% de Bentonita Sódica  
Natural e Ativada (R10)**

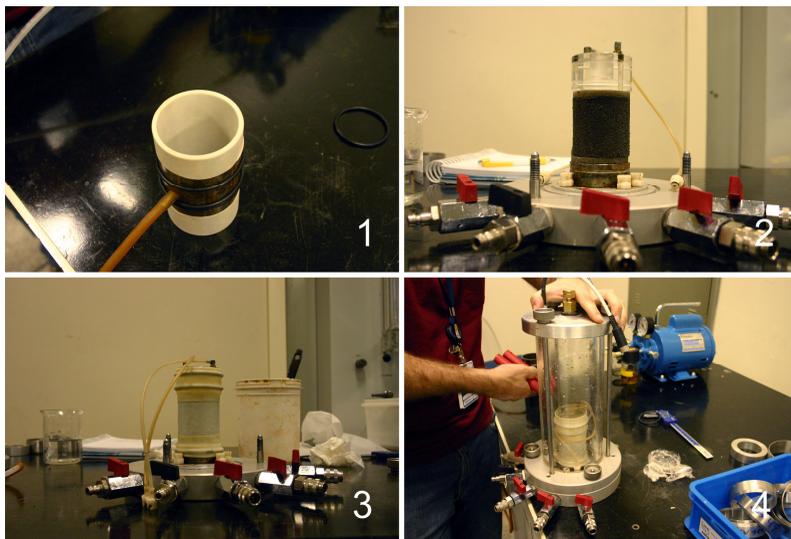
### 3 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁLICA DE ADF

#### 3.1 Ensaio de compactação e moldagem dos corpos de prova para os ensaios de condutividade hidráulica.



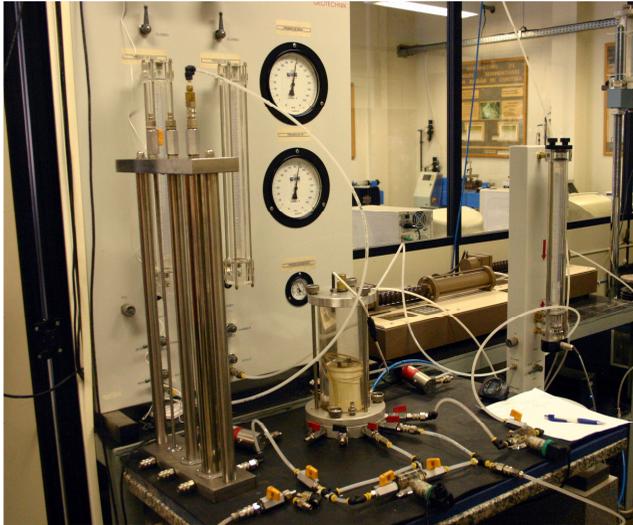
Legenda: 1 – Ensaio de Compactação com energia Proctor Normal; 2 – Extração da amostra de ADF compactada; 3 – Moldagem do Corpo de Prova; 4 – Regularização do perímetro do Corpo de Prova; 5 – Regularização das extremidades do Corpo de Prova; 6 – Corpo de Prova moldado.

### 3.2 Montagem do corpo de prova na célula triaxial.



Legenda: 1 – Passador de membrana com a membrana de látex em seu interior; 2 – Esquema pedra porosa – corpo de prova – pedra porosa – top cap sobre o pedestal da célula triaxial; 3 – Conjunto completo de pedra porosa, corpo de prova, top cap, membrana de látex fixados com o`rings no pedestal da célula triaxial; 4 – Câmara triaxial sendo parafusada na base da célula triaxial.

### 3.3 Execução do Ensaio de Condutividade hidráulica e Percolação



Legenda: 1 – Execução do ensaio de condutividade hidráulica; 2- Execução do ensaio de percolação.