

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**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.**

Mailyn Kafer Gonçalves

FLORIANÓPOLIS, SC
MARÇO/2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**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.**

Mailyn Kafer Gonçalves

Trabalho submetido à Banca Examinadora
como parte dos requisitos para a conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental – TCC II

Orientadora
Schirlene Chegatti, Msc.

FLORIANÓPOLIS, SC
MARÇO/2011

Gonçalves, Mailyn Kafer

Estudo da relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e a percolação de Areias Descartadas de Fundição com diferentes teores de Bentonita. / Mailyn Kafer Gonçalves – Florianópolis, 2011. 79 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientação: Schirlene Chegatti, Msc.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

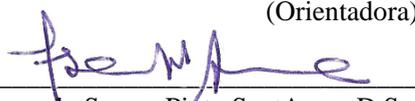
**ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E A PERCOLAÇÃO DE
AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO COM DIFERENTES
TEORES DE BENTONITA EM SUA COMPOSIÇÃO.**

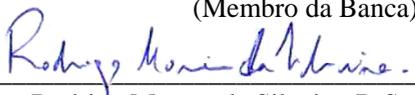
MAILYN KA FER GONÇALVES

Trabalho submetido à Banca Examinadora como
parte dos requisitos para a conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental –
TCC II

BANCA EXAMINADORA:


Schirlene Chegatti, Msc.
(Orientadora)


Fernando Soares Pinto SantAnna, D.Sc.
(Membro da Banca)


Rodrigo Moraes da Silveira, D.Sc.
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, SC
MARÇO/2011

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio e Dirlei, pelo amor e cuidados que sempre me deram, além de toda a dedicação para que eu e minhas irmãs tivéssemos uma boa formação.

Às minhas irmãs, Mayana e Mariáh, por saber que se preocupam mesmo sem dizer nada, eu sei que poderei contar com vocês sempre que precisar.

Ao meu querido Felipe, que está comigo mesmo antes de eu iniciar minha jornada de graduação. Obrigada por toda ajuda, todo apoio e carinho, amor e paciência dada todos esses anos. Você faz eu me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

À Ani e ao Richard, pelo apoio dado quando comecei a morar em Joinville. Esse trabalho tem uma grande porcentagem de ajuda de vocês.

À Schirlene, que me deu a chance de conhecer a Schulz e admirar o trabalho feito por eles. Por possibilitar a realização desse trabalho, me orientar e dar ânimo mesmo quando eu desanimava a cada imprevisto ocorrido no caminho.

À Schulz, e em especial ao setor de Qualidade e Meio Ambiente Automotiva por me receberem tão bem. Um agradecimento especial à Taisa, que me deu todo auxílio e toda a força para a realização desse trabalho.

Ao pessoal da Acquaplant, em especial à Karina e à Fabi, que dedicaram seu tempo de trabalho a mim, permitindo que eu aprendesse sobre as análises realizadas neste trabalho.

Ao pessoal do LAME, em especial ao Rodrigo e ao Marcelo. Foram poucas semanas de convívio, porém, com um enorme aprendizado. Obrigada pela disposição em auxiliar-me em todos os momentos em que precisei de vocês.

Às minhas amigas da época de colégio, que mesmo sem paciência com minha ausência, possuem muita paciência com a minha ausência. Agora vou conseguir ver vocês com mais frequência. Lívia, eu não te abandonei.

Aos amigos que conheci na faculdade, que apesar de muitos estarem longe, eu sei que a distância não vai fazer com que nossa amizade seja esquecida.

Aos meus compadres, Leo e Ná, que me proporcionaram a alegria de ter por perto a linda Sofia. Obrigada pela amizade e confiança. Vocês, junto com a Fifi, já fazem parte de minha família.

“A natureza reservou para si tanta liberdade que não podemos nunca penetrar completamente com o nosso saber e a nossa ciência.”

Johann Goethe

RESUMO

Em um processo de fundição, a maior quantidade de resíduos gerados é atribuída às Areias Descartadas de Fundição - ADFs, consideradas também como uma das maiores produções de resíduos, em volume, do Brasil. Estudos das características das areias descartadas estão em desenvolvimento em todo o mundo, buscando alternativas para o reuso deste resíduo. A análise da relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e a percolação de ADFs, de acordo com os diferentes teores de bentonita foi o objeto de estudo do presente trabalho. Os resíduos de areia de fundição são compostos por areia, argila (bentonita), pó de carvão e materiais finos. A bentonita, que possui a função de ligante no processo de fundição, tem como característica fornecer maior retenção de água às ADFs. Com isso, atribui ao resíduo uma baixa condutividade hidráulica, necessitando de um equipamento específico para saturar por contra-pressão as amostras de ADFs. O permeâmetro triaxial de parede flexível foi o equipamento utilizado na determinação do coeficiente de condutividade hidráulica e para a obtenção do percolado. O permeâmetro foi desenvolvido com base nas normas ASTM D5084 e ABNT NBR14545. Alguns elementos químicos, tais quais: alumínio, bário, cádmio, chumbo, cromo, fenóis, ferro, fluoretos, manganês, também foram analisados para a realização do estudo de percolação. A análise do percolado baseou-se nas normas Standard Methods 3111 – B / D, Standard Methods 4500 – F / E, Standard Methods 5530. Os resultados apresentados mostraram que as amostras de ADF analisadas apresentam baixa condutividade hidráulica, com a ordem de grandeza de 10^{-7} cm/s e 10^{-8} cm/s. Para se obter o volume de percolado necessário para análise, fez-se incrementos de pressões, acima das pressões usuais de campo para solos compactados, obtendo tensões de 50 kPa e 100 kPa. Os valores de investigação da Resolução CONAMA 420 foram utilizadas como base comparativa aos valores de concentração dos elementos químicos do percolado das ADFs analisadas. Os percolados analisados apresentaram concentrações dentro de valores esperados para processos de fundição, apresentando maiores concentrações de Ferro e Alumínio.

PALAVRAS-CHAVE: areia descartada de fundição; coeficiente de condutividade hidráulica; permeâmetro triaxial de parede flexível; percolação.

ABSTRACT

In the foundry process, the largest amount of waste generated is attributed to the Waste Foundry Sands - WFS, also regarded as one of the largest production of waste by volume in Brazil. Characteristics studies of the waste sands are in development around the world seeking alternatives to reuse this material. The variation analysis between the hydraulic conductivity coefficient and the percolation of WFS, according to the different percentage of bentonite were the object of the present study. Waste foundry sand are composed of sand, clay (bentonite), coal dust and fine materials. The Bentonite, which has the function of binder in the casting process, is characterized by providing greater water retention in the WFS. This gives the residue a low hydraulic conductivity, requiring special equipment to saturate by counter-pressure the WFS samples. The triaxial flexible wall permeameter equipment was used to determine the hydraulic conductivity coefficient and to obtain the percolate. The permeameter was developed based on ASTM D5084 and ABNT NBR 14545. Some chemical elements such as: aluminum, barium, cadmium, lead, chromium, phenols, iron, fluoride, manganese, were also analyzed for the percolation study. The percolate analysis was based on the Standard Methods 3111 – B / D, Standard Methods 4500 – F / E, Standard Methods 5530. The results showed that the WFS samples analyzed have a low hydraulic conductivity, in a magnitude of 10^{-7} cm/s e 10^{-8} cm/s. To obtain the required percolate volume for analysis, some pressure increments were made above the usual pressures of compacted soils obtaining pressures of 50 kPa and 100 kPa. The investigations values of CONAMA 420 were used as a basis for comparative chemical elements concentration values on the WFS percolate analyzed. The percolates analyzed shows that the concentration were in the expected values for casting processes, shown higher concentrations for iron e aluminum.

KEYWORDS: waste foundry sand; hydraulic conductivity coefficient; flexible wall triaxial permeameter; percolation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS.....	Erro! Indicador não definido.
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 O PROCESSO PRODUTIVO DE INDÚSTRIAS DE FUNDIÇÃO	18
2.1.1 Moldagem	19
2.1.2 Fusão	20
2.1.3 Acabamento	21
2.2 AREIA A VERDE DE FUNDIÇÃO.....	21
2.3 BENTONITA	25
2.4 GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO	27
2.5 PERMEÂMETRO TRIAXIAL DE PAREDE FLEXÍVEL ..	29
2.6 COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA ..	31
2.7 PERCOLAÇÃO	35
3 METODOLOGIA	38
3.1 DEFINIÇÃO DAS AMOSTRAS DE ADFs A SEREM ENSAIADAS	38
3.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	40

3.3	DESENVOLVIMENTO DO PERMEÂMETRO TRIAXIAL DE PAREDE FLEXÍVEL	43
3.4	ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	46
3.4.1	Fase de Percolação	47
3.4.2	Fase de Saturação.....	48
3.4.3	Determinação do Coeficiente de Condutividade Hidráulica.....	49
3.5	OBTENÇÃO DO PERCOLADO.....	51
3.6	ANÁLISE DOS ELEMENTOS QUÍMICOS DO PERCOLADO	52
3.6.1	pHmetro	53
3.6.2	Espectrofotômetro de absorção atômica para medição de metais.....	53
3.6.3	Cromatógrafo de íons para medição de fluoretos	56
3.6.4	Colorimetria na medição de fenóis	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
4.1	TEOR DE UMIDADE E ÍNDICE DE VAZIOS DAS AMOSTRAS DE PERCOLADO	60
4.2	ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DAS AMOSTRAS.....	61
4.3	ANÁLISE DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NOS PERCOLADOS COLETADOS.....	64
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE UM PROCESSO DE FUNDIÇÃO.	19
FIGURA 2. FORÇAS ADESIVAS E COESIVAS NUMA AREIA DE MOLDAGEM.	26
FIGURA 3. FLUXOGRAMA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO. ...	28
FIGURA 4. ESQUEMÁTICA DO PERMEÂMETRO.	30
FIGURA 5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.	43
FIGURA 6. MONTAGEM DO CORPO DE PROVA NA CÉLULA TRIAXIAL.	47
FIGURA 7. FASE DE PERCOLAÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.	48
FIGURA 8. EXECUÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.	50
FIGURA 9. AMOSTRAS DE PERCOLADO COLETADAS DOS CORPOS DE PROVA DAS ADFs APÓS A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.	52
FIGURA 10. ETAPAS DO ENSAIO DE ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA.	55
FIGURA 11. ETAPAS DO ENSAIO DE FLUORETOS UTILIZANDO O CROMATÓGRAFO DE ÍONS.	57
FIGURA 12. DETERMINAÇÃO DE FENÓIS PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO..	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.-. VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K).	33
TABELA 2.-. COMPOSIÇÃO TÍPICA E PROPRIEDADES DA AREIA A VERDE. 39	
TABELA 3.-. DEFINIÇÃO DAS AMOSTRAS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES DE MOLDAGEM.	39
FONTE: ADAPTADO DE ROSSETTO (2010).	39
TABELA 4.-. RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE DE CURVA DE COMPACTAÇÃO.....	41
TABELA 5.-. DIFERENÇA PERCENTUAL DE UMIDADE COM RELAÇÃO AO ENSAIO DE ROSSETTO (2010).	60
TABELA 6.-. DIFERENÇA PERCENTUAL DE ÍNDICE DE VAZIOS COM RELAÇÃO AO ENSAIO REALIZADO PARA O PROJETO RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO (2010).....	61
TABELA 7.-. COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DAS AMOSTRAS DE ADF. 62	
TABELA 8.-. COMPARATIVO DOS VALORES DE COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.	63
TABELA 9.-. CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NO PERCOLADO R4.	65
TABELA 10.-. CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NO PERCOLADO R7.	66
TABELA 11.-. CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NO PERCOLADO R10.	67
TABELA 12.-. MÉDIAS DA CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NOS PERCOLADO E VALORES DE INVESTIGAÇÃO DA RESOLUÇÃO CONAMA 420.	68

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço do crescimento econômico, as indústrias de todo o mundo começaram a se desenvolver para acompanhar esse ritmo imposto. Neste cenário encontram-se as indústrias de fundição, que atuam significativamente no mercado mundial, fornecendo itens para diversos setores, dos quais pode-se citar o automotivo, o bélico, de siderurgia, de eletrodomésticos, os ferroviários, etc.

O Brasil, com uma produção de 2 milhões e 297 mil toneladas, e um faturamento de 6,9 bilhões de dólares em 2009, ocupa a sétima posição na produção de fundidos do mundo. A projeção para o Brasil em 2014 é de uma produção de 4 milhões e 400 mil toneladas (ABIFA, 2010).

A Associação Brasileira de Fundição – ABIFA contabilizou, ainda em 2009, cerca de 1.400 empresas de fundição no país, que são compostas, em sua maioria, por indústrias de fundição de ferro. Os principais insumos dessas fundições consistem na energia elétrica, água, areia, argila e pó de carvão. Como matéria-prima pode-se citar as ligas metálicas, ferro gusa, ferro nodular, sucatas de aço, etc. (CHEGATTI, 2010).

Da produção total de fundidos, 58% são destinadas ao setor automotivo, sendo a maioria composta de pequenas e médias empresas (ABIFA, 2010). Como exemplo, pode-se citar a Schulz S.A., localizada em Joinville, Santa Catarina, que hoje é responsável pela produção de cerca de 72.494,34 toneladas de peças fundidas por ano para o setor automotivo, fornecidas para diversos países.

Assim como em qualquer outra atividade, uma indústria de fundição também gera resíduos. No caso dos fundidos, o resíduo gerado de maior impacto são os das Areias Descartadas de Fundição – ADFs, já que o processo mais utilizado entre as fundições existentes no mundo é o de areia a verde. A denominação areia a verde é dada ao processo de compactação da areia de moldagem na etapa de confecção dos moldes. Segundo Silva (2007), do total de resíduos gerados, 80% correspondem às areias de moldagem.

As Areias Descartadas de Fundição representam um dos resíduos de maior volume no Brasil, gerando cerca de 2 milhões de toneladas de areia por ano, localizadas em sua maior parte nas regiões Sul e Sudeste (SILVA, 2007). São classificadas em sua maioria, segundo a ABNT NBR 10.004, como resíduos Classe II-A (não inertes) (CHEGATTI, 2010; SILVA 2007).

Devido ao grande volume gerado, destinados a aterros industriais, os resíduos de ADFs acabam se tornando custosos às empresas de fundidos, além de gerarem um impacto significativo ao meio ambiente. Por estes motivos, diversos estudos estão em desenvolvimento acerca das características e dos processos para a valoração dos resíduos de Areias Descartadas de Fundição.

O estudo em questão aborda essa temática na busca pela valoração das Areias Descartadas de Fundição, através da análise da relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e a percolação deste tipo de resíduo. A análise realizada permite mostrar as características dos resíduos de ADFs, estudadas neste trabalho, para uma posterior utilização deste como sub-produto de outros processos, ao invés de descartá-lo em aterros industriais.

Serão determinadas as condutividades hidráulicas das amostras de ADFs com diferentes teores de bentonita, recolhidos os percolados gerados, e analisados alguns elementos químicos dos percolados de coletados. A correlação da quantidade da argila com os resultados obtidos será considerada. Os parâmetros utilizados na análise de lixiviado do estudo de Rossetto (2010) foram levados em conta para a escolha dos metais a serem analisados nos percolados coletados no presente trabalho, utilizando para a análise os elementos químicos: alumínio, bário, cádmio, chumbo, cromo, fenóis, ferro, fluoretos, manganês. O pH das amostras de percolado também foi determinado.

O estudo desenvolvido faz parte de uma parceria entre o Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC com a empresa Schulz S.A., inserindo-se no Projeto de Resíduos de Fundição.

Para a realização do ensaio de determinação da condutividade hidráulica e para a obtenção do percolado analisado, realizou-se ainda uma parceria da empresa Schulz S.A. com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME do LACTEC, em Curitiba, Paraná. Foram desenvolvidas as etapas para a construção de um permeâmetro triaxial de parede flexível e dos ensaios neste equipamento, após sua confecção.

As amostras de percolado coletadas no LAME foram encaminhadas ao Laboratório Acquaplant Soluções Ambientais, localizado em Joinville, Santa Catarina, para a análise dos elementos químicos anteriormente citados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e a percolação de Areias Descartadas de Fundição (ADF) com diferentes teores de bentonita na sua composição.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Desenvolvimento de um permeâmetro triaxial de parede flexível.
- b) Determinação dos parâmetros de condutividade hidráulica das amostras de ADF, com diferentes teores de bentonita em sua composição.
- c) Obtenção do percolado de amostras com diferentes percentuais de bentonita.
- d) Análise da concentração de elementos químicos no percolado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O PROCESSO PRODUTIVO DE INDÚSTRIAS DE FUNDIÇÃO

Segundo o Anuário 2010 do Guia de Fundição da ABIFA, o Brasil abrange em sua maioria indústrias de fundição de pequeno e médio porte, empregando em 2009 cerca de 50.000 funcionários no setor. Possui a sétima colocação no setor de fundição no mundo, com uma produção de 2 milhões e 297 mil toneladas em 2009.

O processo de fundição é definido como um método de obtenção de peças metálicas, através do vazamento de um metal líquido dentro de moldes, e posterior resfriamento e solidificação, confeccionados a partir de um modelo (DUARTE, 1999; COSTA E GIÃO, 2001; CARNIN, 2008; CHEGATTI, 2010). As peças podem conter ainda cavidades internas, obtidas através da inserção de machos, confeccionados com areia e resinas. Os machos são inseridos no interior dos moldes (CARNIN, 2008).

Os componentes principais de um processo de fundição são os modelos, machos e moldes. Os modelos constituem uma réplica perfeita da peça a ser produzida, com acréscimos nas dimensões do material para compensar a contração e a usinagem. Podem ser feitos de madeira, metal, resina, ou outros materiais. (PERINI, 1986). Os machos constituem as peças confeccionadas para dar detalhes ou cavidades à peça fundida, e são inseridos nos moldes (KONDIC, 1973). Os moldes correspondem ao formato negativo da peça em que será vazado o metal líquido (CHEGATTI, 2010).

O processo em areia a verde, apresentada no item 2.2, inicia no misturador com a homogeneização de areia base, areia de retorno, argila e aditivos, todos em proporções adequadas para cada tipo de fundição. Esses componentes, misturados, formam a areia de moldagem, na qual são confeccionados os moldes. Após, com uma mistura de areia e resinas, são feitos os machos, que seguem inseridos nos moldes na fase de preparação. A próxima etapa consiste em vazar o metal líquido nos moldes, onde ocorre a transferência de calor entre a areia e o metal, seguindo para a separação peça – molde. As peças fundidas seguem ao setor de acabamento e controle de qualidade, enquanto a areia é retornada ao processo de preparação (MATOS E SCHALCH, 2000). A

Figura 01 apresenta um fluxograma simplificado do processo de fundição.

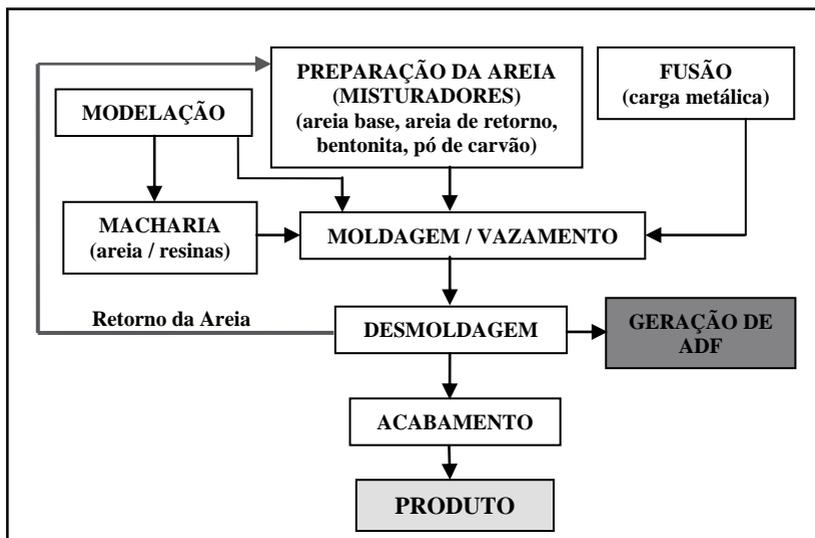


Figura 1. Fluxograma simplificado de um processo de fundição.

Fonte: Adaptado de Quissini (2009).

Observando o fluxograma acima, verifica-se que as etapas principais descritas em um processo de fundição são: a moldagem, a fusão e o acabamento. Tais processos estão descritos nos itens a seguir.

2.1.1 Moldagem

O desenho da peça é feito, e a partir dele confecciona-se o modelo. A mistura da areia de moldagem é socada em torno do modelo, dando início ao processo de moldagem e fornecendo assim o formato negativo da peça na caixa de moldagem. O modelo é retirado e os machos colocados na posição pré-determinada. As partes superior e inferior das peças moldadas são fechadas, e após, seguem para a linha de vazamento, onde serão alimentado com metal líquido. O material da areia de moldagem permanece com a forma da cavidade até o final da solidificação do metal e início do processo de desmoldagem (KONDIC, 1973).

As caixas de moldagem podem ser de armação metálica ou outro material resistente aos grandes esforços submetidos durante a compactação. Devem ainda conter, sustentar e manter a areia a verde, utilizada na realização do molde (COSTA E GIÃO, 2001).

A moldagem é feita de forma manual ou mecanizada. Na moldagem manual o método de prensagem é o manual, sendo utilizado para produções pequenas, gerando maior quantidade de resíduos. A moldagem mecanizada, no entanto, utiliza modelos em placas (dois lados), os quais são colocados em dois pinos guias de uma prensa pneumática, juntamente com a caixa de moldar. Neste processo se obtém uma prensagem uniforme, utilizado para grandes quantidades de peças, sendo apenas realizado com a utilização de areia a verde (SILVA, 2007).

2.1.2 Fusão

Através dos fornos de fusão é obtido o metal no estado líquido, que é vazado nos moldes através de canais de alimentação. Os canais de vazamento alargados ou massalotes são abertos para permitir a passagem do metal para a cavidade do molde. O vazamento deve ser constante a fim de impedir a sedimentação da escória no interior do molde (CAMPOS FILHO, 1978).

Pode-se remover a escória durante a fusão e o vazamento, retirando-se todo o material indesejável na parte superior do metal líquido. Contudo, em muitos casos deixa-se uma camada inferior a 1 centímetro de escória, a fim de proteger o banho (OLIVEIRA, 1998).

Os canais de alimentação servem também como um reservatório, onde o metal pode fluir para a cavidade do molde, compensando qualquer contração do metal durante a solidificação (COSTA E GIÃO, 2001). De acordo com os autores, o processo de fusão deve ser capaz de providenciar ao material fundido a temperatura apropriada, na quantidade desejada, com qualidade aceitável e custo razoável. A temperatura do metal é determinada pela espessura da peça fundida.

2.1.3 Acabamento

Após o vazamento, a peça fica no molde até a solidificação e resfriamento, para então passar pelo processo de desmoldagem. Este processo ocorre por meio de vibração, onde são removidos a mistura de areia e os machos queimados, dando início a etapa de acabamento da peça. Desmoldada a peça, realiza-se manualmente a quebra de canais ou massalotes. As peças são levadas para o jateamento de aço, após escovação e esmerilhagem de rebarbas, que não fazem parte do dimensional do fundido, terminando o processo de limpeza. Algumas peças precisam passar também por um processo de tratamento térmico, para rearranjo da sua estrutura interna, e uma etapa de pintura, dando fim ao processo de acabamento (CHEGATTI, 2010).

As peças fundidas podem apresentar defeitos de fabricação ao término de todas as etapas. Costa e Gião (2001) descrevem tais defeitos como:

- Projeções metálicas;
- salpicos;
- inclusões;
- cavidades, podendo ser internas ou externas, redondas e rugosas, incluindo furos e cavidades contraídas;
- descontinuidades, como fendas e rupturas a frio e a quente;
- faces defeituosas, como pregas, dobras, abas, rugosidade, areia aderente e oxidação.

De acordo com os autores, a fundição é considerada como uma tecnologia vantajosa, por produzir peças complexas, de variados tamanhos, com cavidades internas e seções côncavas, feitas com materiais difíceis de maquinar. As peças podem variar de tamanho, desde milímetros a metros, e seu peso, podendo ter quilogramas ou toneladas.

2.2 AREIA A VERDE DE FUNDIÇÃO

A areia de moldagem recebe a denominação de areia a verde devido ao seu processo de fabricação, no qual grãos com diferentes tamanhos são dispostos no compactador e com aplicação de uma força externa se acomodam, compactando-se (SILVA, 2007).

A areia a verde de fundição é definida então como uma mistura de elementos, que combinados possuem características de perfeita trabalhabilidade, compondo a caixa de moldagem (CUNHA et al., 2005).

A areia a verde é um sistema heterogêneo, constituído essencialmente por um composto granular refratário como base da mistura, um elemento ligante ou aglomerante, e aditivos, responsáveis pela melhora das propriedades mecânicas do sistema (BOFF et al., 2006). Após a mistura, a areia adquire características de maleabilidade, compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos, expansividade volumétrica, permeabilidade e perfeita desmoldagem (BONIN, 1995).

As areias de moldagem podem ser classificadas, segundo a Comissão de Estudos de matérias-primas do Caderno Técnico da ABIFA (1996), conforme sua mistura, sendo estas:

- a) Areia de sistema: é a mistura básica, que conta com a inserção da areia de retorno no sistema, corrigindo a propriedade correta da areia a verde para confeccionar o molde;
- b) Areia de faceamento: é uma mistura com propriedades específicas, utilizada quando a areia de sistema não oferece as propriedades necessárias para se obter um determinado fundido.

Os elementos básicos da composição da areia a verde descritos por Mello (2004) são: a areia base (normalmente de sílica) argilas (sendo a bentonita a argila utilizada), o pó de carvão e a água. A seguir, alguns elementos básicos serão apresentados.

Água

A água atua na mistura com o aumento da umidade no sistema, permitindo uma maior coesão entre os componentes (DUARTE, 1999).

Areia base

A areia base é o principal componente da areia a verde, constituindo o refratário da mistura. É um agregado fino, mineralogicamente puro, constituído essencialmente de sílica (óxido de silício – SiO_2) (SCHEUNEMANN, 2005).

A areia de sílica é a mais utilizada como areia base devido à maior disponibilidade no mercado e menor custo. Há casos onde se necessitam utilizar outros tipos de areias em função da temperatura elevada na fundição das peças no molde (MELLO, 2004). As areias

usadas em temperaturas mais elevadas são a zirconita, a cromita, a olivina ou a chamote, segundo a Comissão de Estudos de matérias-primas – CEMP, do Caderno Técnico da ABIFA (1996).

Argilas

O termo argila é dado para um grupo de partículas naturais e terrosas de alta plasticidade, que realiza trocas catiônicas. As argilas fazem parte de um complexo grupo de hidrossilicatos, com partículas cristalinas finas, conhecidas como “argilominerais”, metacolóides e amorfos (QUEIROZ, 1997 apud DE LEÓN, 2002).

Os argilominerais, os quais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro e algumas vezes magnésio certo teor de elementos alcalinos e alcalino-terrosos. Podem estar presentes nas argilas por partículas de apenas um tipo ou por partículas de diversos tipos de argilominerais (SANTOS, 1975).

Os argilominerais são, em sua maior parte, subdivididos em função de suas propriedades estruturais, que respondem pelo desempenho desse material em diversas aplicações (GRIM, 1963). A lista abaixo resume simplificadamente a forma e as dimensões médias das partículas dos principais argilominerais (BRINDLEY, 1952, 1958 apud SANTOS, 1975):

- a) Caulinitas: possuem placas de perfil hexagonal ou irregular, com diâmetro de $0,1\mu$ a 3μ .
- b) Haloisitas: em forma de tubos, com cerca de $0,2\mu$ de diâmetro externo até alguns microns de comprimento.
- c) Montmorilonitas: possuem forma de placas ou lâminas de perfil irregular, muito finas, com tendência a se agregarem na secagem, de diâmetro inferior a 1μ e espessura podendo chegar até a 10Å .
- d) Ilitas: placas de perfil irregular, às vezes hexagonal e ripas, de diâmetro de cerca de 1μ .
- e) Paligorsquitas e Sepiolotas: formada de fibras de até 5μ de comprimento e diâmetro até $0,1\mu$.

As argilas podem ser empregadas em uma série de produtos acabados em decorrência de suas propriedades adequadas, abundância e por ser de fácil manuseio. Possuem poder adsorvente, podendo ser empregadas como peneiras moleculares, agentes descorantes e clarificantes de óleos vegetais e minerais, suportes catalíticos, agente de filtração, como adsorventes de óleos em água, etc. (SOUZA et al., 2000).

A argila, quando misturada com areia e água, se desagrega em partículas lamelares finas, que recobrem de forma contínua os grãos de quartzo, ligando-os entre si. Isso porque, com a adição da água, as partículas de argila desenvolvem uma película de recobrimento de argila + água ao redor dos grãos de areia (SANTOS, 1975). Conforme o autor, em um processo de fundição, o teor de umidade mais alto faz com que a película que recobre os grãos de areia gradualmente se torna mole e plástica, permitindo que uma parte do material seja extrudada entre os grãos, preenchendo os vazios, e resultando em um aumento de massa específica aparente a verde. O ponto de máxima resistência à compressão a verde é obtido com um teor de umidade menor do que o requerido para a massa específica aparente, contudo, algumas vezes esses dois pontos se confundem, de acordo com a natureza da argila empregada.

As argilas que apresentam resultados satisfatórios como aglomerantes de areia de fundição são: as cauliniticas e haloisíticas, as argilas ilíticas e as montmoriloníticas, especialmente as bentonitas (GRIM, 1963). Klinky e Fabbri (2007) afirmam que os principais ligantes inorgânicos e mais usuais são as argilas, mais especificamente a bentonita, que apresenta características mais favoráveis a essa finalidade.

As bentonitas, normalmente possuem propriedades plásticas e coloidais elevadas, além de apresentarem grandes variações em suas propriedades físicas. Essas variações são geralmente atribuídas a variações na natureza dos cátions trocáveis, que neutralizam a estrutura cristalina, e a fatores estruturais e composicionais (SANTOS, 1975).

O autor expõe ainda que as bentonitas que compõem a areia de fundição podem ser de dois tipos: sódicas ou cálcicas. As sódicas são usadas como ligantes quando se deseja uma maior resistência a seco e a quente, enquanto a cálcica é utilizada quando a obtenção de uma colapsibilidade elevada é de maior importância que a resistência a seco e a quente. As bentonitas mais utilizadas na areia de moldagem são as sódicas.

Pó de Carvão

O pó de carvão é um elemento carbonáceo, aditivo da areia a verde, formado por carbono fixo, cinzas, água e enxofre (COSTA E GIÃO, 2001). Na indústria metalúrgica é conhecido como “cardiff”. É um material volátil, com grande poder de expansibilidade ao ser

aquecido. O pó de carvão na mistura de areia a verde tem por objetivo (MELLO, 2004):

- a) Reduzir a expansão da sílica;
- b) evitar que o metal líquido penetre no molde;
- c) melhorar o acabamento superficial da peça.

Outros aditivos ainda podem ser utilizados na mistura de areia a verde como a dextrina, o pó de madeira, entre outros (COSTA E GIÃO, 2001).

A areia a verde normalmente é reutilizada na própria fundição, em um processo chamado regeneração. A areia se incorpora à mistura da areia de moldagem e é regenerada devido à alta qualidade em termos de distribuição granulométrica, por manter ativas as suas propriedades, e características uniformes da mistura, como a proporcionalidade entre a areia, o pó de carvão e a bentonita (MELLO, 2004). Contudo, conforme o autor, em toda a etapa de reutilização ocorre o descarte de um percentual de areia a verde e acréscimo de areia base na mistura, na mesma proporção. O acréscimo ocorre devido às perdas das características refratárias da areia de sílica e da reação ativa, com perdas volumétricas, da bentonita.

2.3 BENTONITA

As bentonitas são argilominerais que fazem parte do grupo montmorilonitas, possuindo em sua constituição cerca de 80 a 90% de esmectitas, presentes como principais constituintes. São argilominerais comuns na natureza, encontrando-se em diversos solos, sedimentos e produtos com alterações hidrotermais (GRIM 1963).

As montmorilonitas são compostas por duas camadas tetraédricas de SiO_2 e uma camada octaédrica, geralmente de alumínio, podendo também ser de ferro, manganês ou outros, isoladamente ou em combinação (SANTOS, 1975). De acordo com o autor, na estrutura da bentonita podem ocorrer substituições isomórficas, em porcentagens moderadas, do alumínio pelo silício nas posições tetraédricas. Esta troca mais conhecida como “intercâmbio catiônico” depende do pH da suspensão, temperatura e principalmente da concentração dos cátions (BROWN E BRINDLEY, 1980 apud VIOTTI, 2006).

A bentonita é compreendida como um empilhamento de lamelas, interligadas quimicamente face a face. No processo de fundição, o

misturador de areia faz a dispersão dessas lamelas, envolvendo os grãos de areia. A resistência da areia a verde é obtida através da adesão, com a ligação da argila ao grão areia, e da coesão, que é a ligação entre os grãos de argila (DUARTE, 1999). As forças presentes na argila podem ser verificadas na Figura 02.

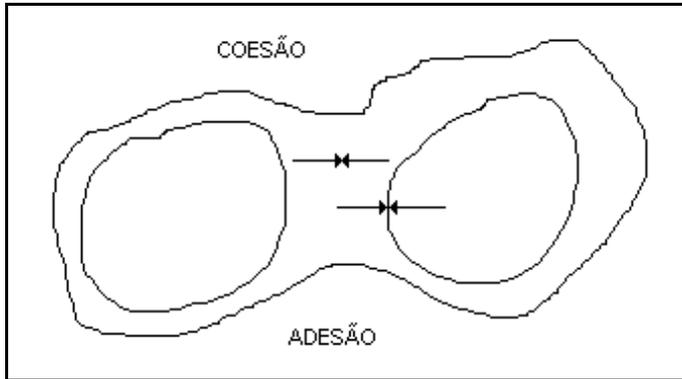


Figura 2. Forças adesivas e coesivas numa areia de moldagem.
Fonte: Duarte (1999).

O teor de umidade no sistema de areias de moldagem sofre o efeito direto destas forças, onde, a partir de 15% de umidade em relação à argila, ocorre um decréscimo da coesão e aumento gradativo da adesão. Quando o teor de umidade chega a 25%, estas forças se igualam, sendo conhecidas como ponto de aderência (DUARTE, 1999). O autor afirma também que as bentonitas usadas como aglomerantes em areias de moldagem podem ser cálcicas ou sódicas, e em uma fundição ocorrem diferenças entre as bentonitas sódicas e cálcicas, as quais são:

a) Bentonitas sódicas:

- Maior plasticidade a quente;
- maior resistência a tração a úmido, pois possui uma maior absorção de água na zona de condensação;
- maior tempo de ativação a verde;
- maior durabilidade a temperaturas mais altas, já que o Na^+ possui uma temperatura para fixação térmica maior;
- maior grau de inchamento e contração, possibilitando o aumento da capacidade de acomodação da expansão térmica da areia base.

b) Bentonita cálcicas:

- Menor resistência a tração a úmido;
- menor tempo para desenvolver a resistência a verde durante a preparação;
- maior facilidade para a secagem da mistura, pois há maior facilidade de entrada e saída de água pelas lamelas.

Quando não há bentonita sódica natural disponível, utiliza-se a prática de converter a bentonita cálcica em sódica através da ativação. O processo foi desenvolvido e patenteado na Alemanha, em 1993, pela empresa Erbsloh & Cia., por um tratamento à base de carbonato de sódio (Na_2CO_3 + água = barrilha) (ROSSETTO, 2010). No Brasil a bentonita disponível é do tipo cálcica, sendo comum às fundições utilizarem as bentonitas ativadas.

As principais características das bentonitas são: o alto poder expansivo, a tixotropia, constituição coloidal, alta capacidade de troca catiônica, elevada superfície específica e baixa condutividade hidráulica (MORANDINI, 2009).

2.4 GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

A reutilização das areias de moldagem no próprio sistema é um procedimento padrão nas indústrias de fundição. Os resíduos de areia são rotineiramente rastreados e incorporados novamente ao sistema para o reuso. Contudo, com o uso constante das areias de retorno, algumas partículas perdem suas propriedades no processo de moldagem. Essas partículas eventualmente ficam mais finas, e combinadas à degradação decorrente do calor do vazamento, necessitam ser periodicamente descartadas e, em contrapartida, deve ser adicionada areia nova (Clean Washington Center - CWC, 1996).

As Areias Descartadas de Fundição – ADFs são compostas basicamente por areia base (em geral de sílica), argila (normalmente bentonitas), carvão e material fino (COSTA E GIÃO, 2001). Geralmente as ADFs são não-perigosas, de cor preta e com muitos finos em sua composição (CWC, 1996). Os resíduos de areia também incorporam teores de elementos constituintes das ligas fundidas, mas estes raramente superam os limites da norma ABNT NBR 10.004, constituindo exceções notáveis as areias descartadas por fundições de

bronzes ou de ferros fundidos brancos de alto cromo (SCHEUNEMANN, 2005).

A norma ABNT NBR 10.004 classifica a areia de fundição como resíduo perigoso (CLASSE I) ou não inerte (CLASSE II), de acordo com o processo utilizado, de moldagem ou de macharia. Estima-se que mais de 95% das areias de fundição de ferro são classificadas como resíduo Classe II-A (SILVA, 2007).

Dos resíduos presentes no processo de fundição, 80% são resultantes das areias de moldagem, sendo o restante decorrente das areias de macharia (ABIFA, 2006). Estes fins são formados desde a preparação da mistura até a desmoldagem das peças sólidas, e podem conter em sua constituição bentonita calcinada, bentonita ativa, pó de carvão calcinado, grãos de areia moídos, entre outras partículas finas existentes em uma fundição (BAUMER E DEMATTE, 2005).

O Brasil gera quase dois milhões de toneladas de resíduos de areia de fundição por ano, correspondendo a três quartos do total dos resíduos produzidos pela indústria de fundição (ABIFA, 2006).

A Figura 03 apresenta o fluxograma das atividades do processo de fundição com os respectivos resíduos gerados.

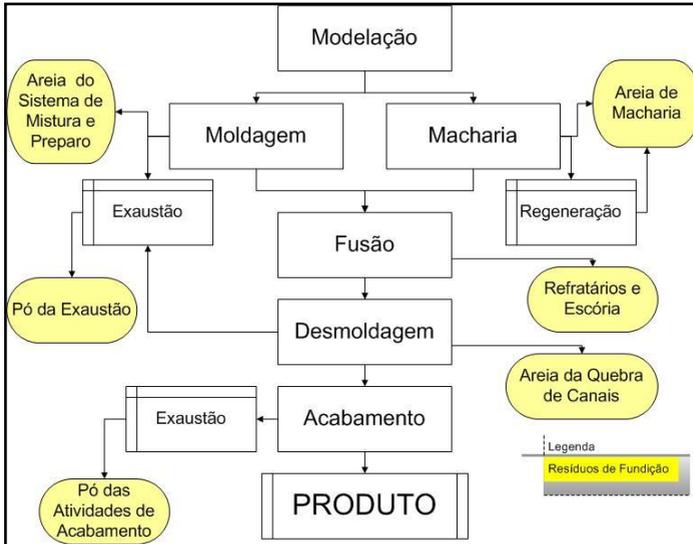


Figura 3. Fluxograma da Geração de Resíduos de Fundição.

Fonte: adaptado de Chegatti (2004).

Algumas ações e estudos estão sendo tomadas quanto ao reaproveitamento das areias descartadas de fundição. Em Santa Catarina, a Resolução CONSEMA N° 011, de agosto de 2008, estabelece critérios para a utilização da Areia Descartada de Fundição (ADF) de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto, sem função estrutural. A norma ABNT NBR 15702/2009 define diretrizes para aplicação das ADFs em asfalto e em aterro sanitário. (ROSSETTO, 2010).

Na construção civil a reutilização dos resíduos possibilita a redução no uso de recursos naturais e demanda de energia para sua extração, o aumento da vida útil dos aterros sanitários e industriais, pela diminuição do volume ocupado pelos resíduos e a redução de custos totais, diretos e indiretos na construção de habitações (BIOLO, 2005).

As ADFs possuem ainda outros tipos de usos, já com aplicação em países como Estados Unidos e Suécia, citados abaixo (ROSSETTO, 2010):

- a) Em pavimentação asfáltica (base e sub-base) e de concreto.
- b) Em obras de terraplenagem: para emendas de solo, como material de enchimento em trincheiras.
- c) Nos processos de compostagem.

É importante salientar que outros resíduos são gerados no processo de fundição, contudo estes representam uma menor parcela, dos quais pode-se citar: o pó de exaustão, gerado pelo sistema de mistura e preparo da areia; as escórias e refratários, oriundos da fusão dos metais; a areia da quebra de canais; e o pó das atividades de acabamento (ABIFA, 2006).

2.5 PERMEÂMETRO TRIAXIAL DE PAREDE FLEXÍVEL

A norma americana ASTM D5084 (1990) e a norma brasileira ABNT NBR 14545 recomendam a utilização de um permeâmetro de parede flexível para a determinação da condutividade hidráulica de materiais porosos, que possuam valor do coeficiente de condutividade hidráulica menor ou igual a 1×10^{-3} cm/s.

A ABNT NBR 14545 é fundamentada na Lei de Darcy, considerando a existência de proporcionalidade direta entre as velocidades de fluxo e gradiente hidráulicos. A norma citada admite a saturação completa da amostra, além da continuidade do escoamento,

sem variação do volume do solo durante todo o ensaio. Utiliza-se para esse método a aplicação de estágios de contra-pressão, com o controle das pressões efetivas.

No ensaio de condutividade hidráulica utilizando o permeâmetro de parede flexível, o corpo de prova após moldado é montado no interior de uma câmara triaxial com uma pedra porosa em cada extremidade e envolto por uma membrana flexível de látex. O equipamento possui uma drenagem no topo e na base, com finalidade de saturar o corpo de prova e as linhas de drenagem (DOURADO, 2003). O esquema de um permeâmetro de parede flexível pode ser visualizado na Figura 04.

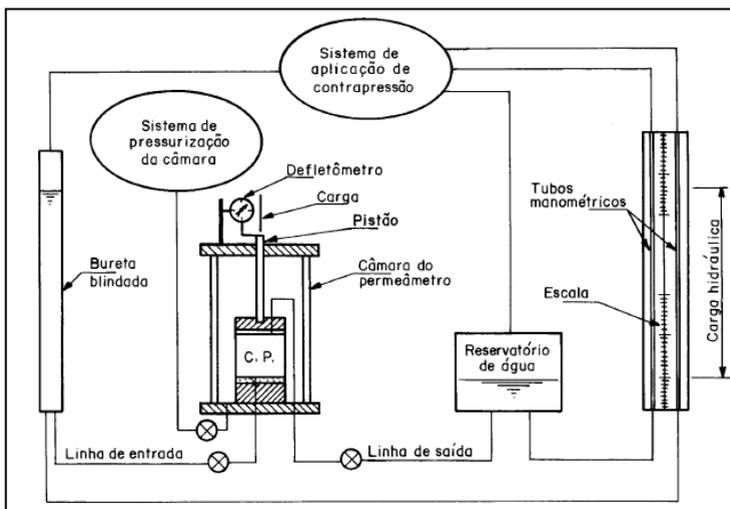


Figura 4. Esquemática do Permeâmetro.

Fonte: ABNT NBR 14545.

Inicialmente percola-se água pela amostra para eliminar os vazios da mesma. Após realiza-se a etapa de saturação da amostra, onde o ar ainda presente em seus vazios dissolve-se na fase líquida, em um processo que pode demorar poucas horas ou vários dias, dependendo principalmente da matriz do solo. A contra-pressão requerida para a saturação efetiva varia de acordo com o grau de saturação inicial da amostra (DOURADO, 2003). O autor expõe ainda que para estimar a saturação presente e dar continuidade ao ensaio deve-se determinar o parâmetro B, através da variação da pressão confinante de um valor $\Delta\sigma_3$, e medindo a correspondente alteração da variação de poro-pressão Δu ,

conforme a equação (3). A variação Δu será igual a $\Delta \sigma_3$, resultando em B igual a 1, quando o corpo de prova estiver totalmente saturado.

$$\text{Parâmetro B} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (3)$$

Onde:

Δu = variação de poro pressão;

$\Delta \sigma_3$ = variação de tensão confinante.

A norma ASTM D5084 (1990) considera o corpo de prova adequadamente saturado se o parâmetro B for maior ou igual a 0,95 ou para materiais relativamente incompressíveis. Após a saturação do corpo de prova inicia-se a medição da condutividade hidráulica do mesmo.

A confiabilidade de ensaios de condutividade hidráulica com permeômetros de parede flexível torna-se maior devido ao selamento proporcionado pela membrana de látex ao redor do corpo de prova (CRUZ, 2004). Além da vantagem citada, o autor cita que outras podem ser encontradas neste equipamento, tais como as descritas abaixo:

- a) Amostras indeformadas podem ser testadas facilmente;
- b) Ocorre a saturação da amostra, por meio de contra-pressão;
- c) Fácil monitoramento das tensões verticais e horizontais.

Algumas dificuldades em ensaios de permeômetros de parede flexível podem ser evidenciadas também, como: vazamento da membrana, ocasionado por possíveis furos presentes na mesma; vazamentos no sistema, bolhas de ar e efeito menisco na tubulação e nos sistemas de medição de fluxo; variações na temperatura; e, mudanças na estrutura do solo pela reversão da direção de fluxo (DIXON et al., 1999 apud CRUZ, 2004).

2.6 COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

O estudo da condutividade hidráulica nos solos é indispensável quando se trata de casos em que ocorra fluxo de água neste solo (LUKIANCHUKI, 2007). O caso em questão, que aborda a análise do percolado de ADFs, está intrinsecamente ligado ao estudo de permeabilidade dos solos. É através da permeabilidade dos solos que se torna possível o fenômeno de percolação.

A permeabilidade dos solos, por representar a capacidade de percolação dos fluídos através do material, é um dos parâmetros mais importantes nas questões de utilização no meio ambiente, como em coberturas de aterros (QUISSINI, 2009). Através da condutividade hidráulica pode-se escolher o tipo certo de material para a aplicação requerida. No meio ambiente, o coeficiente de condutividade hidráulica pode interferir na escolha do material, podendo este ser o solo ou membranas dos mais diversos tipos, etc. Seu uso transcorre desde cobertura de aterros, como citado anteriormente, materiais filtrantes de impurezas e elementos químicos, até membranas geotêxteis, para o tratamento de águas e efluentes.

Henry Darcy, em 1950, verificou, experimentalmente, a influência de diversos fatores geométricos na vazão da água, através da equação conhecida como Lei de Darcy. A equação de Darcy mostra a proporcionalidade entre a velocidade de percolação da água e o gradiente hidráulico. Quando o gradiente hidráulico for igual a 1, o coeficiente de permeabilidade fica sendo igual a velocidade de percolação (PINTO, 2000). As equações (1) e (2) abaixo apresentam esta relação mencionada.

$$V = K * i \quad (1)$$

Onde:

V = Velocidade de descarga em (cm/s ou m/s)

K = Coeficiente de condutividade hidráulica (cm/s ou m/s)

i = Gradiente hidráulico

$$i = \frac{h}{L} \quad (2)$$

Onde:

L = Altura da amostra (cm)

h = Carga hidráulica (cm)

A permeabilidade é definida por Mohammad (2005) como uma grandeza, que mede a habilidade do solo em conduzir fluidos por seus poros. O autor classifica a permeabilidade como: permeabilidade absoluta, permeabilidade efetiva e permeabilidade relativa.

- a) Permeabilidade absoluta: ocorre quando o solo está em sua saturação máxima, isto é, com 100% de saturação do fluido que o percola.

- b) Permeabilidade efetiva: é definida como uma permeabilidade aparente de uma fase particular do solo (óleo, ar ou água) ou saturação com mais de uma fase.
- c) Permeabilidade relativa: é a porcentagem da permeabilidade efetiva de um fluido específico pela permeabilidade absoluta do solo.

O solo apresenta sua condutividade hidráulica máxima quando está completamente saturado, com seus poros todos preenchidos por água e a conduzindo. Quando o solo apresentar ar em seus poros além da água, não estando saturado, a condutividade hidráulica do solo decresce rapidamente (CARVALHO, 2002).

O coeficiente de condutividade hidráulica é um dos parâmetros de maior variação em materiais inconsolidados, podendo variar de 10^2 cm/s, para materiais de altíssima condutividade hidráulica, como pedregulhos, até 10^{-12} cm/s, para os solos de baixíssima condutividade hidráulica, geralmente caracterizados pela grande quantidade de argilominerais de alta atividade (DOURADO, 2003). Abaixo, apresenta-se a Tabela 01, com valores típicos de coeficientes de condutividade hidráulica de diferentes tipos de solo.

Tabela 1.- Valores típicos de coeficiente de condutividade hidráulica (k).

Tipo de Solo	Valor típico de k (m/s)
argilas	$< 10^{-9}$
siltes	10^{-6} a 10^{-9}
areias argilosas	10^{-7}
areias finas	10^{-5}
areias médias	10^{-4}
areias grossas	10^{-3}

Fonte: Pinto (2000).

Alguns fatores podem influenciar na variação da ordem de grandeza da condutividade hidráulica de um mesmo solo. Esses fatores, segundo Pinto (2000), são:

- a) Estado do solo: Correlacionado com o índice de vazios. Para areias, quanto mais fofo o solo, mais permeável ele é. Já para argilas, a correlação existe entre o índice de vazios e o logaritmo do coeficiente de condutividade hidráulica;
- b) Grau de saturação: Um solo não saturado possui uma permeabilidade menor do que a de um solo totalmente saturado, contudo a diferença é pequena;

- c) Temperatura: O coeficiente de condutividade hidráulica depende do peso específico e da viscosidade da água, que variam com a temperatura. Para se obter uniformidade nos resultados referentes à permeabilidade, se convencionou adotar em 20°C a temperatura da água. Para isso, calcula-se o coeficiente equivalente à temperatura 20° C com relação à temperatura de água medida no ensaio. A norma ABNT NBR 14545/2000 correlaciona a viscosidade da água com a temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20°C (R_T);
- d) Estrutura e Anisotropia: A disposição dos grãos também exerce influência na condutividade hidráulica. Solos com estrutura flokulada (compactado mais seco) permitem maior passagem de água do que solos com a estrutura dispersa (compactado mais úmido), mesmo que possuam o mesmo índice de vazios. Ainda, o coeficiente de condutividade hidráulica em solos na direção horizontal é 5, 10 ou 15 vezes maior do que em solos dispostos na direção vertical.

Um estudo realizado em um solo argiloso siltoso da Jamaica, apresentou a relação da compactação do solo com o seu teor de umidade. Quando o solo foi compactado com um teor de umidade acima do valor de umidade ótima, as partículas se rearranjavam paralelas entre si, formando uma estrutura dispersa, dificultando a passagem do fluxo de água. As compactações com umidades abaixo do teor de umidade ótima tiveram as partículas rearranjadas de forma flokulada, facilitando a passagem do fluxo de água, e conseqüentemente aumentando o coeficiente de condutividade hidráulica (LAMBE E WHITMAN, 1969).

De acordo com Pinto (2000), para determinar o coeficiente de permeabilidade dos solos, pode-se utilizar os procedimentos seguintes:

Métodos Indiretos

Os valores de condutividade hidráulica são obtidos através dos dados de ensaios de adensamento, para estudos de recalques e seu desenvolvimento ao longo do tempo.

Ensaio de Campo

Ocorre por meio de perfuração do solo, conhecendo as características do solo e da perfuração realizada, além das teorias de escoamento de água através de perfurações. São menos precisos que ensaios feitos em laboratórios.

Ensaio de Permeabilidade em Laboratórios

- Permeômetros de Carga Constante: O ensaio é uma repetição da experiência de Darcy.
- Permeômetros de Carga Variável: Utilizado para coeficientes de permeabilidade muito baixos, onde a determinação de condutividade hidráulica por permeômetros de carga constante são poucos precisos.
- Permeômetros de Parede Flexível: descritos no item 2.5.

Os ensaios em laboratório são mais precisos que os de campo, contudo, em campo, o solo se encontra em sua situação real, enquanto que em laboratório as amostras são menos representativas (PINTO, 2000). Os ensaios de laboratório possuem outras vantagens, como o controle das condições de contorno, das quais se tem: a saturação, o nível de tensões efetivas, a carga hidráulica e a direção de fluxo, o tempo de ensaio curto e o baixo custo (DANIEL, 1987, apud LUKIANTCHUKI, 2007).

2.7 PERCOLAÇÃO

O fenômeno de percolação no solo ocorre quando há diferença de potenciais no solo, e a água que ocupa seus vazios passa a se deslocar. Assim, a percolação da água nos solos corresponde à migração da água através de seus vazios (PINTO, 2000). O percolado possuirá características de composição de acordo com o material que será percolado e o líquido que percola no meio.

A energia dissipada por atrito através das partículas de solo é resultante da percolação da água no solo. O atrito entre as partículas provocará no solo uma força chamada força de percolação, que pode ser determinada a partir de uma amostra de solo sujeita à percolação (ORTIGÃO, 1995).

As forças de percolação são importantes para diversos problemas relacionados à mecânica dos solos, como por exemplo, na estabilidade de taludes, onde a existência ou não da percolação influencia na estabilidade do mesmo (ORTIGÃO, 1995). Pinto (2000) afirma que estudos de percolação são importantes no cálculo de vazões, na análise de recalques, e em estudos de estabilidade de encostas. Na área ambiental a percolação é de grande relevância para estudos de aterros sanitários e industriais.

O processo de percolação, para fins de aterros sanitários, é definido como a quantidade de água excedente à capacidade de retenção da umidade do material depositado, no caso, os resíduos sólidos (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993). Em um aterro sanitário, o líquido percolado é constituído essencialmente por sais, metais pesados e material orgânico (COSTA, 2002). A geração e escoamento de percolado em aterros são inevitáveis, e sem o tratamento e disposição adequados, causam problemas ambientais e de saúde pública, que são associados ao lixo (IPT, 2000).

Os principais fatores que interferem na geração de percolados em aterros sanitários são descritos por CASTILHOS (1991):

- Precipitação;
- escoamento superficial;
- evapotranspiração;
- infiltração;
- capacidade de retenção da água;
- grau de compactação do solo;
- composição dos resíduos;
- idade dos resíduos;

A detecção de possíveis contaminantes por líquidos percolados em aterros sanitários devem ser monitoradas com análises de águas subterrâneas e superficiais. O conhecimento da hidrologia da área de instalação de um aterro sanitário ou industrial é muito importante para a verificação do perigo de poluição em que as águas estão expostas pelo percolado. Os principais parâmetros de análise devem ser: DBO, DQO, sólidos, oxigênio dissolvido e metais (CASTILHOS et al., 2003). A concentração dos constituintes do percolado dependem da composição dos resíduos sólidos depositados, além de condições ambientais, tais quais, a umidade, o oxigênio disponível, a temperatura e o pH (COSTA, 2002).

A obtenção do pH em percolados é considerado um dos testes mais importantes na caracterização físico-química do líquido, pois este

parâmetro interfere diretamente na estabilidade e solubilidade de metais presentes em sua composição (FRANCESCHET, 2006). A faixa de variação do pH em solos é ampla, variando de 3 a 10. Em condições ácidas, há a solubilização do alumínio no solo, já em condições extremas, de solos com ácidos livres, orgânicos ou ácidos sulfúricos, pode ocorrer também a solubilização de ferro e manganês (VAN RAIJ, 1991 apud FRANCESCHET, 2006). No solo, os metais são encontrados nas seguintes formas (SHUMAN, 1991 apud FRANCESCHET, 2006):

- Dissolvidos na solução de solo;
- ocupando posições de trocas em inorgânicos constituintes do solo;
- quimiossorvidos em inorgânicos constituintes do solo;
- associados com a matéria orgânica;
- puramente precipitados ou misturados com sólidos;
- presentes na estrutura de minerais primários e secundários;

As características do solo para materiais utilizados como cobertura de resíduos sólidos são importantes, pois através de tais características se obtém a facilitação ou não de parâmetros tais como infiltração e percolação (SENGES, 1969 apud CASTILHOS et al., 2003).

Um estudo com coberturas de aterro foi realizado por quatro anos, onde foram coletados os percolados de cinco coberturas de aterros sanitários em escala piloto, utilizando como materiais solo argiloso e ADFs. A taxa de percolação com as coberturas de aterros de ADFs foram duas vezes menor do que as de coberturas com material argiloso. A conclusão foi obtida após a escavação e verificação dos materiais utilizados, onde observou-se que o solo argiloso foi quebrado através da ação do frio e houve redução da umidade, aumentando diretamente a permeabilidade. O mesmo não ocorreu com as coberturas feitas de Areias Descartadas de Fundação (FILHO, 2002).

3 METODOLOGIA

O início dos procedimentos necessários aos ensaios para análise da relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e a percolação das amostras de ADF com diferentes teores de bentonita, ocorreu com a definição das amostras de ADFs utilizadas. Foram escolhidas amostras com teores de bentonita próximos aos usuais encontrados em processos de fundição.

As amostras foram encaminhadas ao LAME para a moldagem dos corpos de prova, realizada através de ensaios de compactação. No laboratório citado, realizou-se também o desenvolvimento do permeâmetro triaxial de parede flexível, com posterior execução dos ensaios para a determinação da condutividade hidráulica das amostras.

Com os ensaios realizados no permeâmetro de parede flexível pôde-se também coletar o percolado das amostras de ADF, que foram encaminhados ao laboratório Acquaplant para a determinação do pH e da concentração dos elementos químicos alumínio, bário, cádmio, chumbo, cromo, fenóis, ferro, fluoretos e manganês.

Os detalhamentos dos procedimentos acima citados serão descritos nos itens abaixo.

3.1 DEFINIÇÃO DAS AMOSTRAS DE ADFs A SEREM ENSAIADAS

As amostras dos resíduos das areias de moldagem utilizadas neste estudo foram definidas entre as amostras utilizadas por Rossetto (2010) em seu trabalho, dando continuidade ao Projeto Resíduos de Fundição. O estudo realizado por Rossetto continha dez amostras de ADFs, sendo nove amostras sintéticas, ou seja, fabricadas para o estudo, e uma amostra do sistema de produção da Schulz S.A. Neste estudo utilizou-se três das amostras sintéticas mais a amostra do sistema de produção da Schulz.

A produção das amostras sintéticas ocorreu na escola de fundição SOCIESC, localizada em Joinville, Santa Catarina. O processo de fundição foi o de ferro, em moldagem a verde, contando com um misturador com capacidade para 200 kg, máquinas convencionais de moldagem, e um forno a indução. O processo de desmoldagem foi o manual (ROSSETTO 2010).

Os insumos das areias a verde produzidas possuem valores fixos de areia base e pó de carvão, variando apenas os teores de bentonita. A bentonita presente é a sódica, contemplada nas formas natural e ativada. Abaixo segue a Tabela publicada por Rossetto (2010) constando as matérias-primas utilizadas em seu estudo.

Tabela 2.- Composição típica e propriedades da Areia a Verde.

Insumos	Teor utilizado
Areia Base	Fixo
Bentonita Sódica Natural	Variável
Bentonita Sódica Ativada	Variável
Pó de Carvão	Fixo

Fonte: Rossetto (2010).

Os valores de bentonita nas amostras de Rossetto (2010) variaram de 4% a 15%, que representam, respectivamente, os valores mínimos e máximos encontrados na bibliografia como porcentagem de argila em areias de moldagem. Contudo, para este trabalho foram utilizadas as amostras de 4% a 8%, que constituem a variação de valores usuais encontrados na prática em indústrias de fundição.

As amostras de ADF, com o respectivo teor de bentonita e nomenclatura, definidas para utilização neste trabalho são apresentadas na Tabela 03.

Tabela 3.- Definição das amostras para realização dos testes de Moldagem.

Amostra	Teor Bentonita	Total Bentonita (%)
R4	4% ativada	4
R5	8% ativada	8
R7	4% natural + 4% ativada	8
R10	3,25% ativada + 3,25% natural	6,5

Fonte: adaptado de Rossetto (2010).

As amostras foram então denominadas de R4, R5, R7 e R10, como apresentado na Tabela 03, de acordo com nomenclatura já definida por Rossetto (2010). Cada amostra continha inicialmente cerca de 80 quilogramas, sendo que parte foi utilizada no estudo de caracterização e permeabilidade das amostras por Rossetto (2010).

As amostras de ADF permaneceram armazenadas em tambores metálicos após os ensaios realizados por Rossetto (2010), nas dependências da empresa Schulz S.A. Para os ensaios realizados neste estudo foram coletadas amostras deformadas, depois de homogeneizadas manualmente com uma pá. Foram colocados cerca de 7 kg de ADF de cada amostra, em sacos plásticos, vedadas com fita adesiva. As amostras nomeadas seguiram para o LAME, em Curitiba.

3.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os corpos de prova foram moldados com as medidas necessárias para a execução do ensaio de condutividade hidráulica. Estabeleceu-se a dimensão cilíndrica de 5 cm de diâmetro para 5 cm de altura. A norma ABNT NBR 14545, referente à determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argiloso de carga variável, estabelece para ensaios com controle das tensões efetivas um corpo de prova de diâmetro e altura mínima de 3,5 cm. A norma ABNT NBR 14545 determina para ensaios com a utilização de contra-pressão, que assegura ao corpo de prova uma saturação efetiva, um permeâmetro do tipo estabelecido pelo método A, caracterizando um permeâmetro de parede flexível.

O teor de umidade de cada amostra foi medido inicialmente, com a finalidade de se conhecer a umidade real das amostras de ADFs, e assim, calcular a quantidade de água necessária para deixar a amostra em sua umidade ótima (Tabela 4). Foram considerados os valores de umidade ótima estabelecidos por Rossetto (2010). O teor de umidade de cada amostra foi medido segundo a ABNT NBR 6457/86.

Primeiramente, pesou-se três cápsulas metálicas, com tampa, vazias e numeradas, em uma balança de precisão da marca Marte, modelo AS2000C, com resolução de 0,01g. Após, foi colocado solo em cada uma das cápsulas, sendo uma amostra coletada do meio do saco de plástico contendo a ADF, e as outras duas das laterais. As cápsulas com solo foram pesadas e colocadas na estufa da marca Fanen LTDA S. Paulo, do modelo Retilínea, e ajustadas para a temperatura de 105° C a 110° C. As amostras permaneceram por 24 horas na estufa, foram retiradas e pesadas novamente. O teor de umidade é calculado, segundo a norma ABNT 6457/86, pela equação (4):

$$h = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} * 100 \quad (4)$$

Onde:

h = teor de umidade, em %

M₁ = massa de solo úmido mais a massa da capsula, em g

M₂ = massa do solo seco mais a massa da capsula, em g

M₃ = massa da capsula metálica com tampa, em g

Para a compactação dos corpos de prova foram utilizados os resultados do estudo de Rossetto (2010), onde verificou-se a correlação entre o teor de umidade para um peso específico seco máximo. Os dados referentes ao ensaio de Rossetto (2010), e que representam as características utilizadas na compactação das amostras deste trabalho seguem na Tabela 4.

Tabela 4.-. Resultados obtidos na Análise de Curva de Compactação

Amostra	σ_d máx. (g/cm³)	Umidade Ótima (%)
R4 - 4% ativada	1,61	11,16
R5 - 8% ativada	1,63	14,71
R7 - 4% ativada + 4% natural	1,65	14,90
R10 ADF SCHULZ	1,83	10,95

Fonte: adaptado de Rossetto (2010).

A compactação e a moldagem dos corpos de prova foram realizadas por técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME / LACTEC, localizado em Curitiba, Paraná. O ensaio baseou-se na norma ABNT NBR 7182/86, utilizando a energia de compactação Proctor Normal. A execução do ensaio se deu através de sucessivos impactos de um soquete padrão sobre a amostra colocada em camadas de 3,33 cm de espessura dentro de um cilindro metálico. Cada amostra de ADF foi compactada em 3 camadas com a espessura acima descrita, onde cada camada recebeu 26 golpes. O soquete de compactação e o cilindro metálico utilizados, segundo a norma, foram o de tamanho pequeno.

Para iniciar a compactação, as amostras foram pesadas em uma balança de precisão de 0,1g, obtendo-se o valor de 2,5 kg. As amostras foram destorroadas, e após, umedecidas até o valor da umidade ótima ensaiado por Rossetto (2010). Homogeneizaram-se as amostras umedecidas, e então colocou-se a primeira camada de solo no cilindro metálico. Compactou-se a amostra com energia Proctor Normal, fez-se

escaras para agregar a primeira camada de ADF à segunda e repetiu-se o processo por mais duas vezes, completando as 3 camadas de compactação. Terminada a compactação, a amostra de ADF formada foi levada ao extrator de amostra, retirando a mesma do cilindro metálico.

O teor de umidade das amostras foi conferido após a homogeneização das amostras umedecidas, onde se colocou em duas capsulas metálicas a amostra já umidificada, e realizou-se o processo de obtenção do teor de umidade das amostras, de acordo com a ABNT NBR 6457/86, como descrito anteriormente.

Após a compactação realizou-se a moldagem dos corpos de prova, que foram talhados com uma faca afiada em um diâmetro e altura aproximados de 5 cm. Colocados em um berço metálico, os corpos de prova tiveram suas extremidades regularizadas. Fez-se um corpo de prova por amostra, totalizando oito corpos de prova.

A Figura 05 mostra o ensaio de compactação e moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios de condutividade hidráulica.

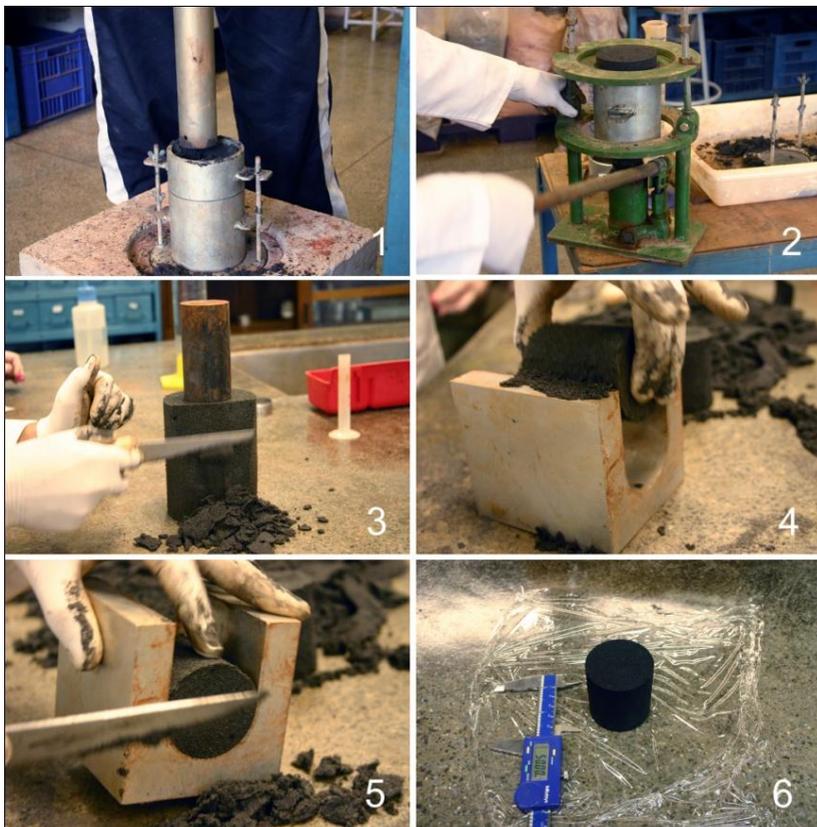


Figura 5. Ensaio de compactação e moldagem dos corpos de prova para os ensaios de condutividade hidráulica. Legenda: 1 – Ensaio de Compactação com energia Proctor Normal; 2 – Extração da amostra de ADF compactada; 3 – Moldagem do Corpo de Prova; 4 – Regularização do perímetro do Corpo de Prova; 5 – Regularização das extremidades do Corpo de Prova; 6 – Corpo de Prova moldado.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO PERMEÂMETRO TRIAXIAL DE PAREDE FLEXÍVEL

Estudos com Areias Descartadas de Fundição recomendam a utilização de permeômetros triaxiais de parede flexível devido à presença bentonita nas ADFs (QUISSINI, 2009; ROSSETTO, 2010).

Os ensaios de condutividade hidráulica foram executados e comparados com os dados obtidos por Rossetto (2010), que utilizou um permeâmetro de parede rígida na execução de seus ensaios. Ainda, os resultados dos ensaios executados no permeâmetro de parede flexível desenvolvido foram comparados a um pré-ensaio de condutividade hidráulica realizados para o Projeto Resíduos de Fundição, utilizando um permeâmetro triflex, localizados no laboratório de mecânica dos solos da USP.

O desenvolvimento do permeâmetro foi possível através de uma parceria da indústria Schulz S/A com o Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. O equipamento foi montado no LAME, com toda a estrutura necessária para o seu funcionamento.

O permeâmetro de parede flexível foi desenvolvido com base na norma americana ASTM D5084 (1990) – *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*, considerando algumas modificações a fim de facilitar a execução dos ensaios de condutividade hidráulica.

O equipamento assemelha-se ao equipamento de ensaios triaxiais utilizados por Silveira (2003), contudo, o permeâmetro desenvolvido não possui componentes específicos à realização de ensaios triaxiais de adensamento.

Neste ensaio são utilizadas membranas de látex, com espessura de 0,3 mm, diâmetro de 50mm e altura de 170 mm, tal qual utilizada nos ensaios triaxiais de Silveira (2003). O equipamento construído consiste nos seguintes componentes:

- a) Uma célula triaxial;
- b) Painel de controle e aplicação de pressões;
- c) Acumuladores de volume;
- d) Sistema de aquisição e registro de dados.

Célula Triaxial

Compreende a uma câmara de confinamento triaxial com parede de acrílico. Para a realização dos ensaios são necessários ainda uma base e um cabeçote. A câmara deste equipamento é convencional, utilizada em ensaios de compressão triaxiais. A câmara triaxial possui uma capacidade de pressão interna de até 1500 kPa. Para a realização dos ensaios é preenchida com a água destilada e deaerada como fluido confinante.

A base da célula possui um pedestal em seu centro, onde o corpo de prova é instalado para a realização dos ensaios. Conta também com 6 orifícios de entrada ou saída destinados a aplicação das tensões confinante, poro-pressão de água na base, e contra-pressão no topo do corpo de prova.

No topo da câmara triaxial foi instalado um termômetro para o monitoramento das temperaturas de ensaio embora o equipamento estivesse instalado em local com controle de temperatura.

Painel de Controle de Pressões

Constituído por dois manômetros, os quais são alimentados por uma fonte de ar comprimido, permitindo o controle independente de cada uma das pressões aplicadas ao corpo de prova. Esse sistema permite monitorar as variáveis do estado de tensão do solo no decorrer de todo o ensaio.

Acumuladores de Volume

Responsáveis pela transferência de pressão do ar para a água, e posterior aplicação da pressão no corpo de prova.

Os acumuladores de volume foram usinados três tubos, com diâmetros externos de 45 mm, 25 mm e 6,50 mm. Os tubos de aço inox de cada acumulador foram projetados para funcionamento individual ou em conjunto, de acordo com o volume de água que entra ou sai de um determinado corpo de prova.

Nos acumuladores o monitoramento da movimentação interface ar-água ocorre através dos transdutores de pressão diferencial, com os quais pode-se determinar o volume de entrada e saída da amostra em função do tempo.

Sistema de Aquisição e Registro de Dados

Compõe o sistema um microcomputador, o software FIELD CHART e um datalogger FIELD LOGGER. A função exercida pelo sistema compreende em receber as leituras das pressões aplicadas no ensaio e repassá-las ao microcomputador.

A escolha por utilização de um sistema de aquisição de dados deve-se ao maior controle dos ensaios em tempo real, com a gravação dos mesmos em intervalos de tempo definidos.

3.4 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os ensaios de condutividade hidráulica realizados no permeâmetro de parede flexível desenvolvido. Os ensaios seguiram os procedimentos da norma ABNT NBR 14545, método A, referentes a esse tipo de permeâmetro e totalizaram em 4 ensaios.

Inicialmente são realizadas as medidas de peso, altura e diâmetro do corpo de prova moldado. A medição da altura e do diâmetro foi feita em três locais diferentes do corpo de prova para o cálculo do valor médio das três leituras.

A composição pedra porosa - corpo de prova - pedra porosa é colocada no interior da membrana de látex, que se encontra inserida no passador de membrana, sobre o pedestal da base da célula triaxial. Acima da pedra porosa da extremidade superior do corpo de prova, o topcap de acrílico é colocado, deixando-se as mangueiras de drenagem para fora do conjunto montado. A membrana flexível de látex é fixada à base e ao top cap com os o`rings.

As mangueiras de drenagem do topcap são presas à base e em seguida fecha-se, com parafusos, a câmara triaxial. A esquematização de montagem do corpo de prova dentro da câmara triaxial é apresentada na Figura 06.

Para dar continuidade ao processo, deve-se primeiro verificar se as mangueiras e os acumuladores estão completamente saturados. A mangueira do reservatório de água é então ligada à válvula da base da célula triaxial, onde ocorre lentamente o enchimento da câmara com a água destilada e deaerada. O ar presente na célula é drenado pela válvula do topo da câmara, que é fechado após o enchimento.

O ensaio para a obtenção de dados para o cálculo do coeficiente de condutividade hidráulica e posterior obtenção do percolado ocorre em de três etapas distintas, as quais requerem todo o cuidado, para não ocasionar a perda do corpo de prova. As três fases do ensaio são descritas abaixo:

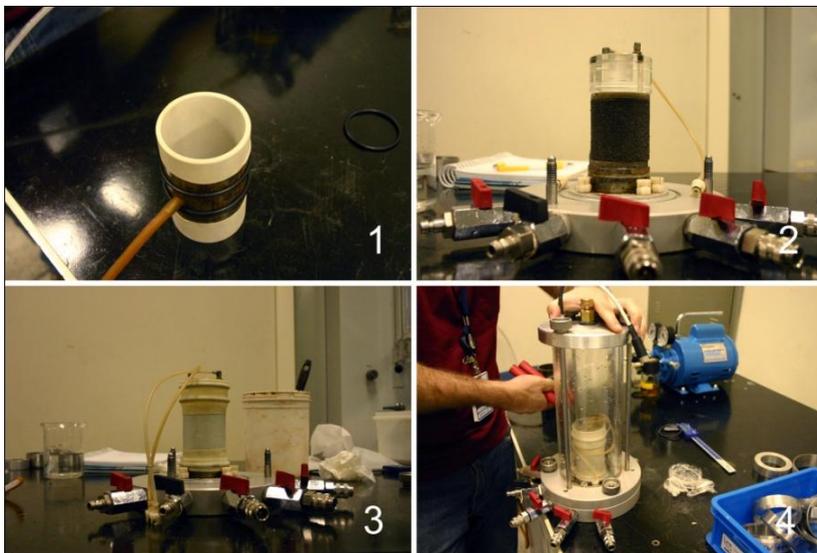


Figura 6. Montagem do corpo de prova na célula triaxial. Legenda: 1 – Passador de membrana com a membrana de látex em seu interior; 2 – Esquema pedra porosa – corpo de prova – pedra porosa – top cap sobre o pedestal da célula triaxial; 3 – Conjunto completo de pedra porosa, corpo de prova, top cap, membrana de látex fixados com o-rings no pedestal da célula triaxial; 4 – Câmara triaxial sendo parafusada na base da célula triaxial.

3.4.1 Fase de Percolação

A fase de percolação é a fase antecedente à saturação do corpo de prova. O objetivo desta percolação inicial é retirar o ar retido entre as peças e o corpo de prova, e o ar retido no sistema, além da tentativa inicial de retirar o ar presente no corpo de prova.

A fase de percolação do estudo utilizou o mesmo procedimento realizado por Silveira (2003), onde a drenagem do corpo de prova foi feita por percolação de água de arada, contida em um reservatório localizado a uma altura de 1 m.c.a., correspondente a uma poro-pressão atuante no interior do corpo de prova de 10 kPa (contra-pressão). A tensão de confinamento aplicada, no entanto, foi de 30 kPa, e não de 40 kPa como realizado no ensaio de Silveira (2003). Assim, a tensão efetiva de confinamento, para a drenagem da água pelo corpo de prova,

nesta fase foi de 20 kPa. Esta pressão é a mínima estabelecida pela norma NBR ABNT 14545.

Nesta etapa pode-se obter o tempo de percolação e o volume de percolado para uma pré determinação da condutividade hidráulica, contudo, estes valores não são representativos.

Cabe salientar que o percolado retirado nesta etapa não é o percolado analisado. O percolado de análise dos elementos químicos neste estudo é coletado após a saturação do corpo de prova. A Figura 07 mostra a fase de percolação do ensaio.



Figura 7. Fase de percolação do ensaio de determinação do coeficiente de condutividade hidráulica.

3.4.2 Fase de Saturação

O tempo de saturação variou para cada corpo de prova, de acordo com o tipo de amostra e pressões aplicadas.

A saturação do corpo de prova foi realizada com o auxílio de um manômetro para a aplicação de pressão na base e no topo, para agilizar o processo de saturação das amostras. As amostras, por possuírem dimensões na proporção de 1:1 e com pouca altura, possibilitaram a

saturação, sem interferência significativa de resultados, pelas duas extremidades e não somente pelo topo.

A saturação por contra pressão do corpo de prova seguiu os procedimentos de saturação de corpo de prova para ensaios triaxiais realizadas por Silveira (2003). Foi realizada em estágios de acréscimos simultâneos de 50 kPa de tensão de confinamento e contra pressão sendo a tensão efetiva para saturação por contra pressão de 20 kPa. (SILVEIRA, 2003).

A amostra R4 variou suas tensões de com acréscimos de 50 kPa a cada meia hora para a pressão confinante e contrapressão, como citado anteriormente, até a tensão de 500 kPa. Após, a saturação começou a ser realizada pela base e pelo topo do corpo de prova. As demais amostras foram saturadas pela base e pelo topo do corpo de prova desde o início da fase de saturação.

As variações de pressão, para a saturação por base e topo foram feitas pelos controladores de pressão, e assim não houve a necessidade de se fechar o sistema a cada meia hora para o incremento das tensões, sendo esta feita de forma gradativa, com um tempo estipulado, pelo equipamento.

Deve-se verificar as medidas de poro-pressão a fim de que a cada variação da contra-pressão, seja refletida na poro-pressão, até que as tensões se igualem, com um valor mínimo de parâmetro de B de 0,97. Assim, o corpo de prova estará saturado quando houver um incremento na pressão confinante, com uma resposta de igual valor na pressão neutra. O cálculo do parâmetro B é feito pela equação (3), encontrado no capítulo 2.6.

Caso o parâmetro B não seja atingido, deve-se continuar o incremento de pressões até que a poro pressão se iguale a pressão confinante.

3.4.3 Determinação do Coeficiente de Condutividade Hidráulica

A determinação dos dados para o cálculo do coeficiente de condutividade hidráulica corresponde à última etapa do ensaio, onde além dos valores de permeabilidade obtidos, coleta-se o percolado para a análise dos elementos químicos.

Atingido o parâmetro B, as válvulas são fechadas, readequando as entradas e saídas de água para o início do ensaio. Verificou-se se o acumulador de saída estava vazio, o de entrada cheio, e o sistema

saturado. O acumulador de entrada de água é conectado na base, e o de saída no topo.

Para os ensaios realizados com os corpos de prova das ADFs, a diferença de pressão entre topo e base utilizada foi de 10 kPa. Nesta fase, o software armazena as leituras de temperatura da água e da variação de tensões na base e no topo. O tempo é registrado a cada segundo para se obter valores significativos.

Quando a variação da tensão entre topo e base se inverte, termina-se a leitura com a estabilização dos valores determinados. A determinação da permeabilidade da amostra é obtida com o volume gerado de percolado pelo tempo de ensaio para obtê-lo. A Figura 08 mostra a execução do ensaio de determinação do coeficiente de condutividade hidráulica no permeâmetro triaxial de parede flexível desenvolvido.

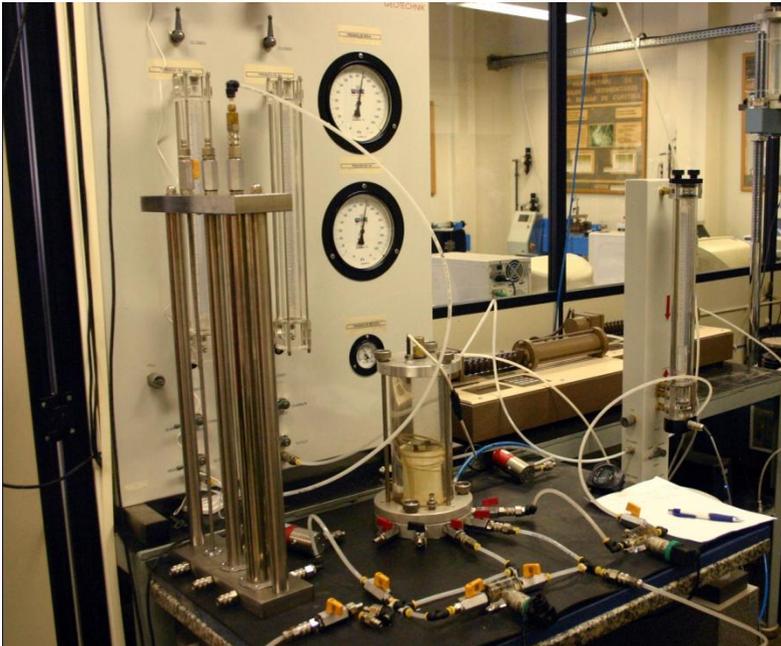


Figura 8. Execução do ensaio de determinação do coeficiente de condutividade hidráulica.

3.5 OBTENÇÃO DO PERCOLADO

Após a determinação do valor do coeficiente de condutividade hidráulica, o corpo de prova continuou o ensaio no permeâmetro triaxial de parede flexível para percolando a quantidade necessária de amostra líquida a ser encaminhada para a análise dos elementos químicos. A amostra com 4% de bentonita continuou o processo de percolação com a mesma diferença de pressão do ensaio de condutividade hidráulica, ou seja, com uma diferença de pressão entre a base e o topo do corpo de prova de 30 kPa.

Os corpos de prova com mais de 6% de bentonita, ou seja, as amostras R7 e R10 tiveram que percolar a água pelo corpo de prova com uma diferença maior de pressão entre base e topo para se obter o volume necessário de coleta para análise. A diferença de pressão base-topo para a obtenção do percolado da amostra R10 foi de 50 kPa, já para a R7, a diferença de pressão chegou a 100 kPa. A amostra R5 não teve seu percolado coletado, devido ao tempo de percolação maior do corpo de prova dessa amostra.

A amostra de 4% de bentonita (Figura 9) foi coletada dos acumuladores de aço inox e para as amostras com mais de 6% de bentonita, utilizou-se uma bureta ligada ao controlador de pressão *Wille Geotechnik DS15*.

As amostras foram recolhidas em dois frascos plásticos, um transparente e um de cor branca, fornecidos pela empresa Acquaplant, responsável pela análise das amostras. O frasco transparente, que corresponde ao menor volume de amostra, foi mantido com um conservante interno de ácido nítrico para $\text{pH} < 2$, e mantido refrigerado.

O frasco branco, de maior volume, não possuía nenhum conservante interno, devendo ser refrigerado a 4°C para a análise. O frasco transparente é o responsável pela análise dos metais alumínio, bário, cromo, cádmio, chumbo, ferro, manganês. Os fenóis e o fluoreto foram medidos pela amostra retirada do frasco branco.

Nos frascos transparentes, a coleta mínima de 150 mL de percolado deveria ser retirada para garantir a realização em triplicata na análise dos metais. Para os frascos brancos foram retirados um volume mínimo de 400 mL de amostras líquidas para a análise de fenóis e fluoretos. A Figura 9 apresenta os frascos transparentes e brancos armazenando o percolado coletado das amostras de ADFs R4, com 4% de bentonita, e R10, com 6,5% de bentonita.



Figura 9. Amostras de percolado coletadas dos corpos de prova das ADFs após a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica. Legenda: R4 – Amostra nomeada R4, com o teor de 4% de bentonita na sua composição; R10 – Amostra nomeada R10, com o teor de 6,5% de bentonita na sua composição.

3.6 ANÁLISE DOS ELEMENTOS QUÍMICOS DO PERCOLADO

A análise do percolado obtido nos ensaios de condutividade hidráulica foi realizada pelo Laboratório Acquaplant Soluções Ambientais, onde se fez a medição do pH do percolado além da leitura dos elementos químicos presentes. Neste trabalho os elementos analisados foram: alumínio, bário, cromo, cádmio, chumbo, fenóis, ferro, fluoreto, manganês.

3.6.1 pHmetro

O pH foi medido com um pHmetro digital da marca Mettler Toledo, modelo SG2. O valor do pH foi obtido das amostras assim que as mesmas chegaram no laboratório. Estas análises foram realizadas a partir do frasco branco, o qual não possuía nenhum conservante de armazenamento.

3.6.2 Espectrofotômetro de absorção atômica para medição de metais

Os metais alumínio, bário, cromo, cádmio, chumbo, ferro, manganês foram medidos pelo método de absorção atômica. Para os metais alumínio e bário utilizou-se o método Standard Methods 3111 D – Método Direto – Chama – Óxido Nitroso – Acetileno. O restante dos metais, cromo, cádmio, chumbo, ferro e manganês, foram realizados pelo método Standard Methods 3111 B – Método Direto Chama – Ar – Acetileno.

O ensaio iniciou com a extração da amostra, através da abertura da amostra. Para tal, foram pipetados 50 mL da amostra, conservada em um copo bécker, adicionando após 1,5 a 2 mL de ácido nítrico concentrado. A adição do ácido nítrico serve para romper as ligações de metais presentes na amostra, para posterior detecção.

As amostras foram colocadas em três copos bécker, com capacidade de 50 mL, como descrito acima, para a realização do ensaio em triplicata. Após, as amostras com ácido nítrico são armazenadas em uma capela de exaustão de gases da marca Spencer Scientific durante duas a três horas, reduzindo seu volume. Os copos becker contendo as amostras ficaram sobre uma chapa aquecedora NT -339 da marca Novatecnica Equipamentos para Laboratório durante todo o tempo de exaustão. Terminado o processo são retiradas as triplicatas e espera-se o resfriamento das amostras ao ar livre.

Em temperatura ambiente as amostras são colocadas em um balão volumétrico de 50 mL para que se possam volumar novamente as amostras. É utilizada água ultra pura para volumar as amostras a 50 mL novamente.

Após as amostras ficarem com o volume inicial novamente, dá-se início a leitura no espectrofotômetro de absorção atômica. O aparelho

utilizado é o SpectrAA 55B – *Atomic Absorption Spectrometer*, da marca Varian.

O espectrofotômetro funciona através da leitura do comprimento de onda emitido pelo queimador de gases a um detector de sinal de elétrons provenientes de uma lâmpada específica para a leitura de cada metal. A chama emitida pelo queimador pode ser de acetileno para a detecção dos metais cromo, cádmio, chumbo, ferro e manganês, ou de óxido nitroso e acetileno para os metais alumínio e bário.

Ao encaixar a lâmpada e a respectiva chama para o metal a ser lido pelo software da SpectrAA, coloca-se a mangueira que fornece a amostra ao sistema no branco, que corresponde à água ultra pura. É realizada a leitura com o branco para garantir que a amostra não esteja contaminada. Coloca-se então a mangueira no padrão respectivo do metal analisado no momento. O padrão é um líquido que serve para padronizar os ajustes de leitura do software.

Quando os ajustes são finalizados inicia-se a leitura de valoração do metal. Primeiro a mangueira passa pelo branco para que não ocorram interferências de resultado, e depois se coloca a mangueira na amostra realizando a leitura do software pelo comprimento de onda emitido pela ionização do metal. É repetida a sequência de branco e amostra até o término da triplicata, onde troca-se a lâmpada, a chama e o padrão respectivo do metal, para dar início à próxima leitura.

A execução do ensaio de espectrofotometria é esquematizada pela Figura 10.



Figura 10. Etapas do ensaio de espectrofotometria de absorção atômica. Legenda: 1 – Abertura das amostras de percolato na capela de exaustão de gases; 2 – Percolato que já passou pela abertura sendo colocado no balão volumétrico; 3 – Balão volumétrico com percolato sendo preenchido com água, até obtenção de 50 mL de amostra líquida; 4 – Colocação dos 50 mL de amostra líquida no copo bécker; 5 – Triplicata das amostras de percolato com o volume de 50 mL para a realização do ensaio; 6 – Lâmpada de leitura dos comprimentos de onda do espectrofômetro, inserida no equipamento; 7 – Chama do ensaio de espectrofotometria.

3.6.3 Cromatógrafo de íons para medição de fluoretos

O cromatógrafo de íons serve para a leitura dos fluoretos que possam estar presentes na amostra. Para a realização do ensaio o percolado, presente no frasco branco, é homogeneizado. Em um copo becker a amostra é colocada e então sugado um pequeno volume com o auxílio de uma seringa. Através da seringa e do filtro Chromafil Xtra PET – 45/25 de gramatura de 0,45 μm volume-se 5 mL de amostra em um vial limpo. Os vial`s são cubetas cilíndricas de plástico próprias para o encaixe no cromatógrafo.

Antes de inserir a amostra no equipamento são encaixados filtercaps nos vial`s para garantir mais uma filtragem da amostra antecedente à entrada da mesma no equipamento. São realizadas três amostragens de 5 mL para se obter uma triplicata de ensaios.

O cromatógrafo de íons utilizado é o Dionex ICS90, com o software Chromeleon, também da Dionex, de leitura da altura de pico do analito fluoreto. O equipamento funciona puxando a amostra para dentro da coluna de detecção, onde no tempo determinado de saída da coluna, o fluoreto é lido no software através dos picos de altura da curva de detecção de analitos do programa.

A execução do ensaio para determinação de fluoretos é mostrada na Figura 11.

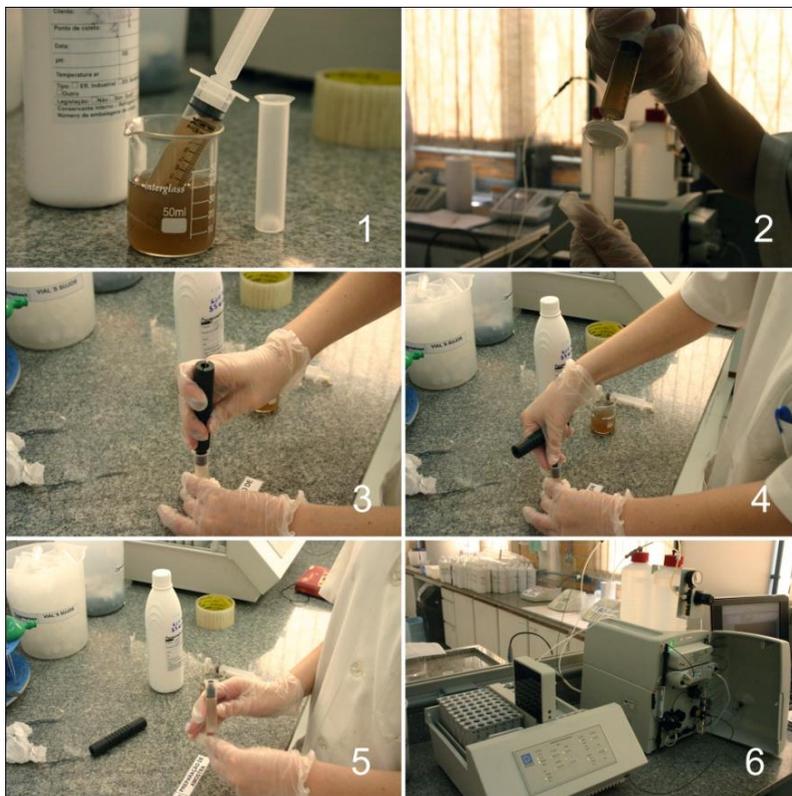


Figura 11. Etapas do ensaio de fluoretos utilizando o cromatógrafo de íons. Legenda: 1 – Amostra de percolado coletada com uma seringa; 2 – Injeção da amostra de percolado no vial, com a utilização da seringa e de um filtro com gramatura de 0,45 μm ; 3 / 4 – Encaixe do filtercap no vial; 5 – Amostra filtrada no vial antes do início do ensaio; 6 – Cromatógrafo de íons e execução do ensaio na determinação de fluoretos.

3.6.4 Colorimetria na medição de fenóis

Os fenóis foram determinados pelo método da colorimetria. Para tal, utilizou-se o kit da Merck Range Phenol Test, 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.

Para a destilação retirou-se cerca de 400 mL de amostra do frasco branco já homogeneizado e colocou-se em uma proveta volumétrica de 500 mL. São adicionadas duas gotas de ácido sulfúrico na amostra, para reduzir o pH da amostra a 2.

Com a amostra avolumada na proveta, houve a transferência da mesma para um balão de destilação que ficou em banho de glicerina de 130°C a 140°C. A amostra fica no processo de destilação até passar toda a parte líquida pelo balão de destilação.

A etapa de destilação ocorre a fim de que a amostra não apresente um falso positivo na detecção do fenol, pois qualquer turbidez presente na amostra pode acarretar neste resultado.

Para o início da leitura de fenóis com o kit da Merck é coletada a amostra já destilada e realizado uma filtração da mesma com um filtro de fibra de vidro, de porosidade de 0,45 µm, garantindo a retirada da turbidez do percolado. São pipetados em 3 tubos de ensaio 10 mL de cada amostra, a fim de realizar a triplicata do ensaio. Utiliza-se mais um tubo de ensaio para a amostragem, com 10 mL de água ultrapura, constituindo o branco da análise, servindo de padrão de leitura.

Em cada tubo de ensaio são colocados 1 mL do pH -1, uma colher dos reagentes pH -2 e pH -3, do próprio kit da Merck. Espera-se o tempo de 10 a 20 minutos para os reagentes atuarem nas amostras. Transfere-se o líquido presente no tubo de ensaio para uma cubeta descartável plástica que encaixa no colorímetro.

O colorímetro utilizado é o NOVA 60 da Merck, onde são inseridas as cubetas de leitura. A primeira cubeta colocada é a do branco, que será o padrão de leitura do equipamento. Após são efetuadas a leitura das outras cubetas, comparando a cor da amostra com o padrão e intensidade da cor para fenóis do kit.

A Figura 12 apresenta esquematicamente os procedimentos para a realização do ensaio colorimétrico para a determinação de fenóis.



Figura 12. Determinação de fenóis pelo ensaio colorimétrico. Legenda: 1 – Percolado colocado na proveta volumétrica com duas gotas de ácido sulfúrico; 2 – Amostra de percolado destilada; 3 – Filtragem do percolado destilado; 4 – Enchimento dos tubos de ensaio já com as amostras de percolado destiladas; 5 – Amostras no tubo de ensaio já com os reagentes pH-1, pH-2 e pH-3 utilizados no ensaio; 6 – Transferência do percolado para a cubeta; 7 – Inserção da cubeta no colorímetro para a leitura dos fenóis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TEOR DE UMIDADE E ÍNDICE DE VAZIOS DAS AMOSTRAS DE PERCOLADO

Para a realização do ensaio de condutividade hidráulica, as amostras de ADF foram compactadas para a moldagem dos corpos de prova. A compactação foi realizada com base nos dados do teor de umidade ótima de Rossetto (2010). Abaixo segue a Tabela 05 comparando os teores de umidade de Rossetto (2010) com os obtidos após umidificação das amostras para a moldagem dos corpos de prova.

Os valores de umidade ótima de Rossetto (2010) foram obtidos através de ensaios de curva de compactação, já os valores obtidos nesse estudo foram em decorrência da umidificação realizada para alcançar as umidades ótimas de Rossetto (2010). Para este estudo não foram realizados ensaios de curva de compactação para determinação do valor de umidade ótima de cada amostra. Os valores de umidade ótima foram obtidos a partir da umidificação das amostras de ADF para se chegar a um teor de umidade ótima próximo ao apresentado no estudo de Rossetto (2010).

Tabela 5.-. Diferença Percentual de umidade com relação ao ensaio de Rossetto (2010).

Amostra	Umidade ótima (%) (ROSSETTO, 2010)	Umidade ótima pré-moldagem CP* (%)	Diferença Percentual de Umidade
R4	11,16	10,90	0,26
R5	14,71	13,80	0,91
R7	14,90	14,80	0,10
R10	10,95	10,80	0,15

* Corpos de Prova.

Verifica-se que as condições de ensaio para este trabalho ficaram próximas as de Rossetto, permitindo assim, comparação entre os resultados. Os ensaios de determinação do coeficiente de condutividade hidráulica realizados por Rossetto e pelo Projeto Resíduos de Fundação utilizaram os valores de umidade referenciados na tabela acima.

Após a compactação foi verificado o índice de vazios de cada amostra, comparando-os novamente com os valores obtidos após compactação para o ensaio de permeabilidade realizado para o Projeto Resíduos de Fundição. Esses valores podem ser identificados na Tabela 06.

Tabela 6.-. Diferença Percentual de índice de vazios com relação ao ensaio realizado para o Projeto Resíduos de Fundição (2010).

Amostra	e_{inicial} 1º ensaio (Projeto Resíduos de Fundição)	e_{inicial} pré-moldagem CP*
R4	0,625	-
R5	0,569	0,58
R7	0,493	0,85
R10	0,438	0,67

* Corpos de Prova.

Percebe-se que as amostras de ADF, quando comparadas ao teor de umidade se aproximam bastante, com uma diferença percentual menor que 1, contudo o índice de vazios ainda sofre interferência de compactação, tanto pela diferença entre esses valores, como pela execução da compactação.

As amostras retiradas para esse trabalho possuem seu índice de vazios maiores que as realizadas em um ensaio de permeabilidade prévio realizado para o Projeto Resíduos de Fundição.

A diferença entre os valores apresentados pode interferir nos resultados de coeficiente de condutividade hidráulica, quando comparados os ensaios.

4.2 ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DAS AMOSTRAS

Os ensaios de condutividade hidráulica para a obtenção do percolado serviram também de comparação aos valores de condutividade hidráulica de ensaios anteriormente realizados para as amostras de ADFs selecionadas, sendo três amostras sintéticas e uma do processo produtivo da fundição Schulz S.A. Os valores do coeficiente de permeabilidade das ADFs são apresentados na Tabela 07:

Tabela 7.- Coeficiente de Permeabilidade das amostras de ADF.

Amostra	Coef. de Permeabilidade - k (cm/s) Permeâmetro Triaxial de Parede Flexível	
	Temperatura ambiente	Corrigido para 20°C
R4	—	—
R5	$9,29 * 10^{-8}$	$8,57 * 10^{-8}$
R7	$1,56 * 10^{-7}$	$1,50 * 10^{-7}$
R10	$1,14 * 10^{-7}$	$1,08 * 10^{-7}$

A definição pela escolha das amostras de ADF utilizadas neste trabalho decorreu em consequência do tempo de ensaio das amostras de Areia Descartada de Fundição, que visualmente apresentam características de areia, mas possuem comportamento de argilas, com valores baixos do coeficiente de condutividade hidráulica.

A determinação do coeficiente de condutividade hidráulica seguiu a norma NBR ABNT 14545, a qual apresenta a tabela de conversão de valores de k para a temperatura de 20°C. Verifica-se que mesmo com a conversão, os valores de permeabilidade apresentados possuem a mesma ordem de grandeza.

Os valores de condutividade hidráulica da amostra R4 não foram resgatados do *software* de armazenamento de dados, impossibilitando a sua determinação. Contudo, foi verificado durante o ensaio, que a mesma possui um coeficiente de permeabilidade maior comparado às demais amostras. O percolado, no entanto, foi coletado e encaminhado ao laboratório para análise dos elementos químicos.

Os valores de permeabilidade das demais amostras, que possuem 6,5% e 8% de bentonita, apresentaram características de solos para cobertura de aterros industriais classe II, já que possuem valores de ordem de grandeza de 10^{-7} cm/s e 10^{-8} cm/s. Os aterros industriais de classe II não apresentam obrigatoriedade na colocação de camada de impermeabilização superior, contudo, se existir dever ser constituída de manta plástica ou argila de boa qualidade (com coeficiente de condutividade hidráulica igual ou menor que 10^{-6} cm/s, e espessura maior que 50 cm) (IBAM, 2001).

Na medida em que a porcentagem de bentonita na ADF aumentou, houve também um acréscimo no tempo de percolação das amostras, caracterizando uma elevação na condutividade hidráulica.

A Tabela 08 mostra um comparativo dos valores de permeabilidade entre o presente estudo em relação ao estudo de Rossetto (2010), e um ensaio realizado para o Projeto Resíduos de Fundição.

Rossetto (2010) utilizou um permeâmetro de parede rígida, enquanto os outros dois foram executados por um permeâmetro triaxial de parede flexível.

Tabela 8.- Comparativo dos valores de coeficiente de permeabilidade.

Amostra	k (cm/s) Permeâmetro de Parede Rígida (ROSSETTO, 2010)	k (cm/s) Permeâmetro Triflex (Projeto Resíduos de Fundição)	k (cm/s) Permeâmetro Triaxial de Parede Flexível	
	Temp. ambiente	Temp. ambiente	Temp. ambiente	Corrigido 20°C
R4	$8,70 * 10^{-5}$	$1,16 * 10^{-5}$	–	–
R5	$1,03 * 10^{-5}$	$1,20 * 10^{-7}$	$9,29 * 10^{-8}$	$8,57 * 10^{-8}$
R7	$1,84 * 10^{-5}$	$1,63 * 10^{-6}$	$1,56 * 10^{-7}$	$1,50 * 10^{-7}$
R10	–	$1,42 * 10^{-5}$	$1,14 * 10^{-7}$	$1,08 * 10^{-7}$

A diferença de resultado entre os estudos é perceptível em sua ordem de grandeza para os permeâmetros de parede rígida e parede flexível. A variação de resultados com permeâmetros de parede rígida, para este tipo de material, mostra que este tipo de equipamento sofre com significativas interferências de resultados. Isto decorre da baixa permeabilidade apresentada pelas ADFs, podendo ocorrer o “efeito parede” em ensaios de permeâmetros de parede rígida.

Rossetto (2010) aponta em seu estudo a possibilidade de “efeito parede” em seu ensaio, justificando os valores permeabilidade maiores encontrados. O “efeito parede” ocorre quando o líquido percolante atravessa o corpo de prova através da interface corpo de prova – parede do corpo de prova. Assim, este trabalho valida a utilização de permeâmetros triaxiais de parede flexível para ensaios de condutividade hidráulica utilizando ADFs.

Ao comparar os ensaios realizados no permeâmetro triaxial de parede flexível, é notável que, para as mesmas amostras, a ordem de grandezas dos resultados também foi diferente. A interferência nos resultados pode ter ocorrido pelas diferenças verificadas entre o índice de vazios, os teores de umidade, e conseqüentemente, pela compactação das amostras de ADF.

Outro fator que pode ter influenciado nos resultados são os sistemas de aquisição de dados utilizados, que permitem maior precisão nos resultados. Os ensaios realizados previamente para o Projeto Resíduos de Fundação foram feitos com leitura manual na própria bureta. Já os ensaios deste trabalho, tiveram as leituras realizadas de segundo em segundo e armazenadas pelo *software* de aquisição de dados.

Contudo, sabe-se que mesmo com estes fatores, a interferência nos resultados deveria estar em proporções menores, ou seja, a diferença na ordem de grandeza não deveria ser tão significativa.

4.3 ANÁLISE DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NOS PERCOLADOS COLETADOS

O percolado coletado para este ensaio foi obtido pelo ensaio de permeabilidade. Cabe salientar que este estudo teve que ser realizado com pressões de percolação acima das usuais encontradas em solos compactados, para que o volume de percolado fosse coletado em sua quantidade mínima, permitindo assim, a realização dos ensaios de determinação de elementos químicos em triplicata.

A amostra líquida R5 não pode ser analisada quimicamente, pois a mesma ainda encontra-se percolando, não possuindo o volume necessário para análise. Foi visto nesta amostra, que a vazão de percolação está diminuindo ao longo do tempo.

Os parâmetros do percolado da amostra R4, analisados em triplicata, estão evidenciados na Tabela 09.

Tabela 9.- Concentração dos elementos químicos presentes no percolado R4.

Parâmetros	R4 - 1	R4 - 2	R4 - 3	Média R4
Alumínio (mg/L Al)	14,5	14,7	13,7	14,3
Bário (mg/L Ba)	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Cádmio (mg/L Cd)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chumbo (mg/L Pb)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cromo Total (mg/L Cr)	< 0,030	< 0,030	< 0,030	< 0,030
Fenóis Totais (mg/L C₆H₅OH)	< 0,050	< 0,050	0,060	0,054
Ferro Total (mg/L Fe)	14,022	15,691	15,825	15,179
Fluoretos (mg/L F)	< 0,100	< 0,100	< 0,100	< 0,100
Manganês (mg/L Mn)	0,072	0,067	0,066	0,068
pH (-)	9,20	9,20	9,21	9,204

O percolado desta amostra foi retirado com maior facilidade, quando comparada às outras, devido ao seu percentual de 4% de bentonita. Os valores encontrados com maior concentração foram os de Ferro, Alumínio e Manganês. Tais elementos, segundo Santos (1975), são encontrados nas bentonitas em seu estado natural.

Os demais elementos ficaram próximos ou abaixo do limite de detecção dos equipamentos utilizados para a análise. O pH apresentou-se alto, caracterizando este percolado como básico.

A Tabela 10 apresenta os valores, em mg/L do percolado R7.

Tabela 10.- Concentração dos elementos químicos presentes no percolado R7.

Parâmetros	R7 - 1	R7 - 2	R7 - 3	Média R7
Alumínio (mg/L Al)	3,3	3,4	3,4	3,37
Bário (mg/L Ba)	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Cádmio (mg/L Cd)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chumbo (mg/L Pb)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cromo Total (mg/L Cr)	< 0,030	< 0,030	< 0,030	< 0,030
Fenóis Totais (mg/L C₆H₅OH)	0,160	0,140	0,140	0,147
Ferro Total (mg/L Fe)	3,531	3,913	3,986	3,81
Fluoretos (mg/L F)	0,109	0,100	0,159	0,123
Manganês (mg/L Mn)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
pH (-)	7,30	7,30	7,30	7,30

Os resultados verificados na amostra R7 foram relativamente baixos para Ferro e Alumínio, considerando a presença desses elementos em argilas no seu estado natural. A presença de fenóis no percolado pode ter ocorrido pela volatilização no momento da fusão, e por resquícios de machos presentes no processo de fundição.

O valor de fluoretos ficou próximo ao limite de detecção do ensaio, e os demais elementos abaixo do limite de detecção. Foi detectado à amostra um pH básico.

Os elementos químicos presentes na amostra de percolado R10 são expostos na Tabela 11.

Tabela 11.- Concentração dos elementos químicos presentes no percolado R10.

Parâmetros	R10 - 1	R10 - 2	R10 - 3	Média R10
Alumínio (mg/L Al)	14,5	15,8	15,3	15,2
Bário (mg/L Ba)	1,00	0,91	0,96	0,957
Cádmio (mg/L Cd)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chumbo (mg/L Pb)	0,25	0,24	0,26	0,26
Cromo Total (mg/L Cr)	< 0,030	< 0,030	< 0,030	< 0,030
Fenóis Totais (mg/L C₆H₅OH)	0,160	0,150	0,150	0,150
Ferro Total (mg/L Fe)	31,040	32,328	31,040	31,47
Fluoretos (mg/L F)	< 1,000	< 1,000	< 1,000	< 1,000
Manganês (mg/L Mn)	0,506	0,476	0,495	0,492
pH (-)	7,68	7,68	7,68	7,68

A amostra R10, com 6,5% de bentonita apresentou valores altos para os metais Ferro, Alumínio, Chumbo, Bário e Manganês, além de ser identificada a presença de fenol.

Os valores elevados para o percolado R10 podem ter relação com a quantidade de particulados finos presentes no material, que podem ter carreado suas partículas em maior quantidade para o percolado. Além do suposto, há de ser considerado que a amostra R10, da Schulz, passou pelo processo de fusão por diversas vezes, o que representa em uma quantidade maior de bentonita sem suas características essenciais, como também um maior contato com metais.

Em decorrência da falta de legislação com valores de referência para concentração de substâncias presentes em percolados, utilizou-se a Resolução CONAMA 420 como valores de investigação para águas subterrâneas. A Resolução CONAMA 420 dispõe acerca de critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas.

A Tabela 12 aponta as médias de concentração presentes nos percolados analisado, caracterizando-as como dentro ou fora dos valores de investigação da Resolução CONAMA 420.

Tabela 12.-. Médias da concentração dos elementos químicos presentes nos percolado e valores de investigação da Resolução CONAMA 420.

Parâmetros (mg/L)	R4	R7	R10	Resolução 420 CONAMA Valores de Investigação (águas subterrâneas)
Alumínio	<i>14,3</i>	3,37	<i>15,2</i>	3,5
Bário	< 0,20	< 0,20	<i>0,957</i>	0,7
Cádmio	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	<i>0,26</i>	0,01
Cromo Total	< 0,030	< 0,030	< 0,030	0,05
Fenóis Totais	0,054	<i>0,147</i>	<i>0,150</i>	0,14
Ferro Total	<i>15,179</i>	<i>3,81</i>	<i>31,47</i>	2,45
Fluoretos	< 0,100	0,123	< 1,000	–
Manganês	0,068	< 0,005	<i>0,492</i>	0,40

A Resolução CONAMA 420 não possui valor de investigação para o elemento químico fluoreto, contudo, percebe-se entre as amostras de percolado que sua concentração é baixa.

A concentração de Ferro ficou evidenciada como a maior entre os elementos analisados, em proporção aos valores de investigação. Além da presença de Ferro na argila em seu estado natural, a presença do elemento pode ter ocorrido pela característica das ADFs, que são de indústrias de fundição de Ferro.

Outro possível fator de interferência foi a armazenagem das amostras em tambores metálicos. As amostras de ADFs utilizadas neste trabalho ficaram armazenadas por um longo período de tempo em

tambores metálicos, assim, estava em contato direto com o tambor, podendo este influenciar na concentração de metais encontrados.

O manganês evidenciado, também pode ser interpretado como um elemento presente na bentonita em seu estado natural, pois sua concentração nas amostras de percolado é baixa. A amostra R10, que possuiu um valor maior comparado aos outros percolados, está próximo ao valor de investigação.

As amostras de percolado R4 e R10 apresentaram valores elevados para o alumínio, no entanto a amostra R7, com 8% de bentonita, apresentou concentrações bem mais baixas, estando menor que o valor de investigação. A presença de alumínio também é esperada para amostras com argilas, pois estas possuem alumínio em seu estado natural.

Os fenóis, apesar de estarem presentes, encontram-se em concentrações baixas, mesmo os que ultrapassaram os valores de investigação. Isso demonstra que as ADFs, quando descartadas separadamente dos machos, e não possuem fenóis em seu processo de mistura, não apresentam valores elevados de fenóis. O contrário não pode ser afirmado neste trabalho, pois as ADFs analisadas não apresentam essa característica de mistura com fenóis. Os valores apresentados nas amostras podem ocorrer pela volatilização no processo de fusão ou por resquícios de machos presentes nas amostras.

O metal chumbo foi encontrado no percolado da amostra de ADF R10, em valores acima do esperado. Contudo, a existência desse elemento na concentração apresentada ocorreu possivelmente por contaminação após o processo de fundição, visto que o chumbo é um elemento corrosivo aos refratários dos fornos de fusão de uma indústria de fundição. É possível que esta contaminação tenha ocorrido durante o período de armazenagem da amostra, pelo tambor metálico.

A amostra R10 possui uma maior quantidade de particulados finos e materiais inertes, decorrentes das inúmeras quantidades de retorno que passou no processo de fundição. Como as tensões aplicadas para a retirada do percolado tiveram que ser elevadas, é possível que o percolado tenha criado caminhos preferenciais, carregando assim estes particulados finos. Este fator interfere diretamente na dissolução dos metais, acarretando em um aumento da concentração não apenas dos metais bário e chumbo, mas também de todos os outros metais analisados.

O tipo de procedimento utilizado nas análises também pode interferir. No método direto chama – óxido nitroso – acetileno, a chama é mais elevada, causando maiores instabilidades na determinação dos

elementos que necessitam desta chama como método de leitura. A leitura do bário neste ensaio pode ter influência direta, considerando que o mesmo foi encontrado na amostra R10 e este elemento não possui relação direta com o processo de fundição.

Outro procedimento de análise a ser considerado é o de colorimetria, onde qualquer turbidez na amostra líquida pode interferir no valor real de fenóis presentes no percolado.

Os elementos químicos cádmio e cromo apresentaram-se baixos em todas as amostras de percolado, não possuindo interferência nos resultados apresentados.

É importante salientar que esta análise utilizou, como comparação, os valores de investigação da Resolução CONAMA 420, e por este motivo, os valores que se apresentam acima dos citados pela Resolução, necessitam de maiores análises. Ainda, o cenário crítico idealizado, de elevação das pressões de percolação, pode alterar os resultados, onde, em condições normais de tensões, pode se obter volumes de percolação e concentrações de elementos químicos menores.

Por fim, pode-se dizer que um dos fatores determinantes na escolha das amostras foi a porcentagem usual utilizada nos processos de fundição, que variam normalmente de 6% a 8% de bentonita. A amostra R10, que representa a ADF da Schulz S.A., possui 6,5% de bentonita e já não é mais utilizada nos processos atuais de moldagem, sendo hoje os teores de bentonita utilizados de 7% e 7,5%. Com isso, é notável que os valores apresentados de teores de bentonita de 8%, tais quais nas amostras R5 e R7, enquadram-se perfeitamente nas análises como condições usuais de processos de fundição.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e a percolação das Areias Descartadas de Fundição realizada neste estudo possibilitou verificar algumas considerações evidenciadas nos parágrafos abaixo.

Os valores de coeficiente de condutividade hidráulica das amostras apresentaram-se na ordem de grandeza de 10^{-7} cm/s e 10^{-8} cm/s, enquadrando-se nos padrões de utilização para coberturas de aterros industriais.

O grau de compactação e os parâmetros teor de umidade e índice de vazios das amostras podem causar interferência nos resultados de ensaios de condutividade hidráulica de solos.

Conforme visualizado nos resultados apresentados, ensaios de determinação do coeficiente de condutividade hidráulica e obtenção de percolados referentes às Areias Descartadas de Fundição devem ser realizados com permeômetros triaxiais de parede flexível.

As tensões utilizadas ultrapassam as encontradas em processos usuais de compactação de solos, verificando a indução para a obtenção do volume de percolado necessário para a análise dos elementos químicos. Essa indução pode também aumentar a concentração dos elementos químicos encontrados.

As possíveis contaminações, decorrentes do tipo de armazenamento dos resíduos de fundição, devem ser consideradas e avaliadas como interferentes nas concentrações dos elementos químicos presentes no percolado. Devem ser utilizados recipientes que não influenciem na composição dos elementos químicos presentes, e se obter um percolado representativo. Outro fator de influência a ser considerado em análises de percolado é o tipo de procedimento utilizado na determinação de elementos químicos.

Com as amostras produzidas em uma única passagem pelo processo de fundição (R4 e R7) pode-se comparar as amostras e verificar que quanto maior o teor de bentonita nas mesmas, menor a concentração de elementos químicos encontrados. A comparação não pode ser feita com a amostra R10, visto que esta amostra possui uma maior quantidade de passagens pelo processo, apresentando maior interferência do processo. Assim, o teor de bentonita nas amostras analisadas não foi o único interferente.

O percolado da amostra de ADF R5, com o teor de 8% de bentonita ativada, não pode ser analisado em decorrência do tempo de

percolação da mesma. A quantidade mínima de percolado necessária para análise não foi obtida, visto que, em um período de um mês de percolação a vazão de percolado pelo corpo de prova diminuía ao longo do tempo. Deve-se considerar o tempo de obtenção de percolado em futuras análises em Areias Descartadas de Fundação.

Considerando as discussões e conclusões apresentadas nos resultados deste trabalho, sugere-se a continuação dos ensaios de percolação do restante das amostras de ADFs determinadas por Rossetto (2010), de 8% a 15% de bentonita, referentes ao Projeto Resíduos de Fundação. Os ensaios devem ser realizados para a comparação dos valores de coeficiente de condutividade hidráulica já encontrados, e para a obtenção do percolado para análise de seus elementos químicos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

APHA-AWWA-WEF. **Standard Methods: 311 B: Espectrometria de absorção atômica – chama ar / acetileno**. Washington, D. C. 1998.

APHA-AWWA-WEF. **Standard Methods: 311 D: Espectrometria de absorção atômica – chama óxido nitroso / acetileno**. Washington, D. C. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA) - **VI Seminário de Fundição**. São Paulo, ABIFA: 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). *Guia ABIFA de Fundição: Anuário 2010*. **ABIFA**. Edição 21, 2010. 236 p. Disponível em: <http://pt.calameo.com/books/0001505692e62dd07016e>. Acesso em: 07 jan. 2011.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6.457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7.182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 10.004: Classificação dos Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 14.545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15.702: Areia descartada de fundição - Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário**. Rio de Janeiro, 2009.

BAUMER, B., DEMATTE, C.L. *Influência no teor de finos nas propriedades tecnológicas da areia a verde*. In: Congresso de Fundição. São Paulo, 1995. Anais. São Paulo, 1995.

BIOLO, S.M. **Reuso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos**. Dissertação (mestrado em engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Porto Alegre: 2005.

BOFF et al. Emprego de Areia Usada de Fundição em coberturas intermediária e final de aterros sanitários de RSU. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61. 2006. **Anais**. São Paulo: ABM, 2006.

BONIN, André L. **Reutilização da Areia Preta de Fundição na Construção Civil**. In: Congresso de Fundição. São Paulo, 1995. Anais. São Paulo, 1995.

CAMPOS FILHO, M. P. D. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.

CARNIN, Raquel Luísa Pereira. **Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas**. Tese de Doutorado em Química da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CARVALHO, Laércio Alves de. **Condutividade Hidráulica do Solo no Campo: As Simplificações do Método do Perfil Instantâneo**. Dissertação de Mestrado em Agronomia da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CASTILHOS Jr., A. B. **Produção de Biogás e Líquidos Percolados em Aterros Sanitários. Saneamento Ambiental**. São Paulo, 1991.

CASTILHOS Jr., A. B. et al. **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**. Programa de pesquisa em Saneamento Básico 3. Rio de Janeiro, 2003. p. 294.

CEMP. Comissão de Estudos de Matérias-Primas. *Processo de moldagem em areia verde*. **Fundição e Matérias-Primas** - Caderno Técnico, ed.13, jul/ago. São Paulo, 1996.

CHEGATTI, Schirlene. **Estudo da Influência da Bentonita no Impacto Ambiental das Areias Descartadas de Fundição**. Qualificação para o título de Doutor em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

CONAMA. **Resolução 420**. Ministério do Meio Ambiente: Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2009.

CONSEMA. **Resolução 011**. SDS. Florianópolis: Conselho Estadual de Meio Ambiente. 2008.

COSTA, O., GIÃO, D. **Tecnologia de fundição em areia verde**. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Portugal, 2001.

COSTA, P. O. S. **Avaliação em laboratório do transporte de contaminantes no solo do Aterro Sanitário de Sauípe/Ba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

CRUZ, Rodrigo Caberlon. **Condutividade Hidráulica em solos contaminados encapsulados**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.

CUNHA, Carlos Jorge et al. Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas. In: CONGRESSO DE FUNDIÇÃO, São Paulo, 2005. **Anais**. São Paulo, 2005.

CWC, Clean Washington Center. **Beneficial Reuse of Spent Foudry Sand. Technology Brief**. NIST MEP – Environmental Program; RETAP – Technology Assistance Partnership. Washington, 1996.

DE LEÓN, Alexis Bionel Tejedor. **Modificação Estrutural de Bentonitas Nacionais: Caracterização e Estudos de Adsorção**. Tese para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa – Tecnologia Mineral. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2002.

DOURADO, Kleber Azevedo. **Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade: desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

DUARTE, Iberê R. **Processo Areia Verde.** 1999. Apostila de fundição, Sociedade Educacional de Santa Catarina. Escola Técnica Tupy, Joinville, 1999.

FILHO, do N. I. **Estudo de compostos orgânicos em lixiviado de aterro sanitário.** Tese de Doutorado em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002.

FRANCESCHET, Meire. **Estudo da permeabilidade dos solos de aterros sanitários do Estado de Santa Catarina: Estudo de caso aplicado à Timbó, Chapecó e Curitiba.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy.** Mc Graw-Hill Book Co., U.S.A., p. 43 e 161, New York, 1963.

IBAM. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos.** 15ed. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.ISBN 85-09-00113-8.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado.** D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. (Coord.) 2. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

KONDIC, V. **Princípios Metalúrgicos de Fundição.** São Paulo: ed. Polígono, 1973.

KLINSKY, L.M.G.; FABBRI, G.T.P.. Reaproveitamento da Areia de Fundição como Material de Base e Sub-base de Pavimentos Flexíveis. Transportes, São Paulo, v. 17, n. 2, p.36-44, 01 dez. 2009.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil mechanics, SI version**. New York, John Wiley and Sons Inc. 553 p. 1969.

LUKIANCHUKI, Juliana Azoia. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.

MATOS, Stelvia Vigolvinho; SCHALCH, Valdir. Alternativa da Minimização de Resíduos da Indústria de Fundição. In: 19º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais**. Foz do Iguaçu, 1997.

MELLO, Osmar João de. **Estudo da Viabilidade da Reutilização de Resíduo de Areia Verde de Fundição em Argamassa Colante – Enfoque Ambiental**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, 2004.

MOHAMMAD, Alkhatha'ami. **Permeability, Porosity & Skin Factor**. supervised by Dr. Hazem.Riyadh, Arábia Saudita, 2005.

MORANDINI, Thiago Luiz Coelho. **Condutividade hidráulica e compatibilidade em combinações de solo tropical e bentonita para uso em barreiras**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

OLIVEIRA, Thereza M. N. **Eco-Estratégia Empresarial no setor Metal-Mecânico da Escola Técnica Tupy**. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

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.

PERINI, P. R. **Fundição**. Escola Técnica Federal de Santa Catarina, 1986.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. 247 págs.

QUISSINI, Carina Soldera. **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.

ROSSETTO, Taisa Sandoli. **Caracterização de areias descartadas de fundição com diferentes teores de bentonita**. TCC apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SANTOS, Pérsio de Souza. **Tecnologia de Argilas aplicada às argilas brasileiras**. São Paulo: Edigard Blücher Ltda., Ed. da Universidade de São Paulo, 1975. 2 v.

SANTOS, C.P.F.; MELO, D.M.A.; MELO, M.A.F.; SOBRINHO, E.V. **Caracterização e usos de argilas bentonitas e vermiculitas para adsorção de cobre (II) em solução**. CCET, Departamento de Química. Universidade Federal do Rio Grande do Noite. Cerâmica 48 (308). 2002.

SCHEUNEMANN, Ricardo. **Regeneração de areia de fundição através de Tratamento Químico via Processo Fenton**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SILVA, Tatiane C. **Comparativo entre os regulamentos existentes para reutilização de resíduos de fundição**. TCC apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SILVEIRA, Rodrigo Moraes da. **Propriedades Geotécnicas dos Solos Coluvionares do Gasoduto Bolívia-Brasil em Timbé do Sul (SC)**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre : PPGEC/UFRGS, 2003. 527 p.

SOUZA, J.R.; MELO, M.A.; DANTAS, M.J.; MELO, D.M.A. *Clarificação de Efluentes da Indústria Têxtil utilizando Vermiculita Ativada como Adsorvente: Estudo Cinético e Termodinâmico*. **Anais dos II Encontro Brasileiro sobre Adsorção**. 2000.

TCHOBANOGLIOUS G.; THEISEN, H.; VIGIL S.A. **Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues**. McGraw Hill International editions, Civil Engineering series, McGraw Hill Inc., Singapore. 1993.

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**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. 216 p.