

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E
PESQUISA
COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS**

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE
FUNDIÇÃO COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA
CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO DE RESÍDUOS**

CARINA SOLDERA QUISSINI

CAXIAS DO SUL, 2009

CARINA SOLDERA QUISSINI

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COMO
MATERIAL ALTERNATIVO PARA CAMADA DE COBERTURA DE
ATERRO DE RESÍDUOS**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, Área de Concentração: Materiais para engenharia ambiental. Orientadora Alexandra Rodrigues Finotti.

CAXIAS DO SUL, 2009

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COMO
MATERIAL ALTERNATIVO PARA CAMADA DE COBERTURA DE
ATERRO DE RESÍDUOS**

Carina Soldera Quissini

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, Área de Concentração: Materiais para engenharia ambiental

Caxias do Sul, Julho de 2009.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Alexandra Rodrigues Finotti (Orientadora)
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Irajá do Nascimento Filho
Universidade de Caxias do Sul

Prof^a. Dr^a. Claudia Echevengua Teixeira
Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Prof. Dr. Fernando Marinho
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida.

À minha família, principalmente ao meu esposo Fabrício pelo incentivo e incondicional apoio em todos os momentos.

À minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Alexandra Rodrigues Finotti por todo aprendizado.

À acadêmica de Engenharia Ambiental Franciele Fedrizzi pela dedicação e competência na realização dos ensaios.

Ao Prof. Fernando Marinho, coordenador do Laboratório de Solos da Universidade de São Paulo pela ajuda nos ensaios e pelo espaço disponibilizado.

Ao Prof. Dr. Israel Jacob Rabin Baumvol, pela força dada em momentos extremamente necessários e pelo exemplo mostrado como pesquisador.

Ao Prof. Geraldo Reichert pelos ensinamentos práticos na área pesquisada.

À Voges Metalurgia Ltda, principalmente ao Diretor Presidente Osvaldo Voges, a Diretora de Relações do Trabalho Eduviges Rossa e ao Engenheiro de Segurança Marcelo Nehme que sem o apoio fornecido não seria possível a realização deste trabalho e pela confiança depositada.

Ao colega de trabalho, Julio Slovinski, pela companhia e pelas discussões sobre o tema.

Aos colegas e amigos do Mestrado, principalmente a Larissa Nardini Carli pela união em momentos difíceis e nos momentos de diversão.

A todos os professores do Mestrado em Materiais pelos ensinamentos e momentos especiais que passamos juntos.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABELAS.....	9
RESUMO	10
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Indústria de Fundição	14
2.2. Processo de Fundição	14
2.3 Características das ADF	17
2.4 Argilominerais presentes na areia de fundição	20
2.5 Gerenciamento de resíduos de ADF.....	23
2.5.1 Aplicação da ADF como cobertura de aterro.....	27
2.6 Aterros de resíduos sólidos	29
2.6.1 Camadas de cobertura de aterros.....	29
2.6.2 Geração de gases e percolado	37
2.6.3 Uso de resíduos em camadas de cobertura de aterros	41
2.7 Aspectos legais acerca do assunto.....	43
3 MÉTODOS E TÉCNICAS.....	45
3.1 Caracterização geotécnica	46
3.1.1 Coleta e preparação das amostras.....	46
3.1.2 Índices Físicos	46
3.1.3 Limites de Atterberg (Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez).....	48
3.1.4 Teor de bentonita.....	48
3.1.5 Análise granulometria.....	48
3.1.6 Compactação.....	49
3.1.7 Permeabilidade	49
3.1.8 Absorção	49
3.1.9 Retenção.....	50
3.1.10 Adensamento.....	50
3.1.11 Resistência ao Cisalhamento	51
3.1.12 Ensaio de contração.....	51
3.1.13 Lixiviação.....	52

3.2 Avaliação dos impactos ambientais.	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Índices físicos e limites de Atterberg	53
4.2 Teor de bentonita.....	54
4.3 Granulometria	55
4.4 Compactação.....	56
4.5 Permeabilidade.....	57
4.6 Absorção.....	58
4.7 Retenção	59
4.8 Adensamento.....	61
4.9 Resistência ao Cisalhamento	63
4.10 Ensaio de contração	66
4.11 Lixiviação	69
4.12 Avaliação do impacto ambiental pelo uso de ADF como cobertura de aterro ...	72
4.12.1 Identificação dos impactos.....	72
4.12.2 Quantificação dos impactos ambientais.....	76
5 CONCLUSÕES	77
6 RECOMENDAÇÕES	78
7 REFERÊNCIAS.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma simplificado do processo de Fundição.....	14
Figura 2: Molde de areia	16
Figura 3: Saídas e entradas do processo de fundição.....	17
Figura 4: Compactação para ADF a) 5 a 12% de finos e b) 0 a 5% de finos	18
Figura 5: Estrutura tri-dimensional da bentonita.....	21
Figura 6: Fluxograma do gerenciamento de resíduos.....	23
Figura 7: Aplicações das ADF.....	27
Figura 8: Esquema da pesquisa utilizando três tipos de camadas	28
Figura 9: Esquema de um aterro com os sistemas de revestimento de fundo.....	30
Figura 10: Revestimento de fundo e camada de cobertura	31
Figura 11: Curva de retenção para solos arenoso e argiloso.	37
Figura 12: Configuração de um aterro utilizando resíduo de papel.....	42
Figura 13: Aspectos das amostras estudadas.....	45
Figura 14: Esquema da placa de sucção.	50
Figura 15: Distribuição Granulométrica das amostras AV e PAV.....	55
Figura 16: Curva de compactação da amostra AV.	56
Figura 17: Curva de compactação da amostra PAV.	57
Figura 18: Resultado de absorção.....	58
Figura 19: Curva de retenção em função da umidade gravimétrica.	59
Figura 20: Curva de retenção em função do grau de saturação.....	59
Figura 21: Curva de retenção em função da umidade volumétrica.	60
Figura 22: Resultado do ensaio de adensamento das amostras.	61
Figura 23: Relação do coeficiente de adensamento com a tensão.....	62
Figura 24: Cisalhamento da amostra AV	63
Figura 25: Envoltória de cisalhamento obtidas do ensaio para AV	64
Figura 26: Cisalhamento da amostra PAV.....	65
Figura 27: Envoltória de cisalhamento obtidas do ensaio para PAV	66
Figura 28: Trincas na amostra AV na caixa 40x10x10cm.....	67
Figura 29: Trincas na amostra AV na caixa 40x10x5cm.....	67
Figura 30: Trincas na amostra PAV na caixa 40x10x5cm.....	68
Figura 31: Trincas na amostra PAV na caixa 40x10x10cm.....	68
Figura 32: Resultado de evaporação das caixas	69

Figura 33: Rede de interação de impactos ambientais no processo atualmente utilizado.
.....74

Figura 34: Rede de interação de impactos ambientais do processo utilizando ADF como
cobertura de aterro.....75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas e geotécnicas das ADF.	17
Tabela 2: Aplicação da ADF em alguns países.	24
Tabela 3: Breve descrição entre as aplicações das ADF.....	25
Tabela 4: Materiais utilizados para as camadas no revestimento de fundo.	31
Tabela 5: Materiais utilizados para cada camada de cobertura.	33
Tabela 6: Valores encontrados de permeabilidade de alguns tipos de solos.....	35
Tabela 7: Compostos e valores típicos encontrados nos percolados de aterro.....	39
Tabela 8: Metais presentes no efluente	39
Tabela 9: Materiais utilizados como selantes para controle de gás e movimentação de percolado.	40
Tabela 10: Índices físicos.....	53
Tabela 11: Teor de bentonita.....	54
Tabela 12: Resultados de permeabilidade.....	57
Tabela 13: Dados dos corpos de prova das amostras.....	61
Tabela 14: Cálculo do coeficiente de adensamento.....	62
Tabela 15: Parâmetros do corpo de prova no ensaio de resistência ao cisalhamento.....	63
Tabela 16: Comparativo entre as tensões aplicadas e as tensões alcançadas para amostra AV.	64
Tabela 17: Comparativo entre as tensões aplicadas e as tensões alcançadas para amostra PAV.....	65
Tabela 18: Valores dos ângulos de atrito para as amostras.....	66
Tabela 19: Resultados do ensaio extrato aquoso neutro	70
Tabela 20: Resultado do ensaio extrato lixiviado.....	70
Tabela 21: Comparativo entre as amostras conforme resultados.	71
Tabela 22: Descrição dos impactos conforme símbolo.....	73
Tabela 23: Dados de um aterro.....	76

RESUMO

Os avanços na área ambiental relacionada com a ciência dos materiais têm se mostrado elevados, devido à possibilidade de substituição de materiais convencionais por alternativos que possuam características semelhantes. O setor de Fundição tem um papel importante dentro da economia do país, apresentando também significativos impactos ambientais. Os resíduos mais expressivos nas indústrias de Fundição são as areias descartadas de fundição (ADF) que entram como insumo na montagem dos moldes para a fabricação de peças. Este trabalho tem como objetivo principal caracterizar geotecnicamente e ambientalmente as areias descartadas de fundição do tipo verde de um empreendimento para aplicação como material alternativo em camadas de coberturas de aterros. Os ensaios se basearam nas características geotécnicas, tais como a índices físicos, limites de Atterberg e teor de bentonita. Além disso, foram observados a granulometria e realizados ensaios mecânicos tais como compactação, permeabilidade, absorção, retenção, adensamento, resistência ao cisalhamento e ensaio de trincas. Foi utilizado o ensaio de lixiviação e lixiviado neutro. Os métodos seguiram as Normas Brasileiras (NBR) e da *American Society* (ASTM). Para analisar os impactos ambientais decorrentes da utilização de materiais convencionais e de ADF como camadas de cobertura utilizou-se o método da rede de interação. Em relação aos resultados alcançados pode-se concluir que a amostra areia verde (AV) foi a mais satisfatória. Embora esta não tenha atingido alguns requisitos como os índices físicos. Ainda com a aplicação deste resíduo em camadas de cobertura de aterros pode ser afirmado que é possível eliminar até 12 impactos ambientais provenientes da utilização de solos argilosos.

ABSTRACT

Advances in environmental issues related to materials science have been done due to the possibility of the use of alternative materials replacing conventional ones with similar characteristics. The Brazilian Foundry has an important role in the economy of the country. However, significant environmental impacts are also related to the productive process. The most significant waste of these industries is foundry sand waste (FSW) used as input in the assembly of molds for the manufacture of products. The main objective of this work is the environmental and geotechnical characterization of foundry green sand like an alternative material for application in cover layers to landfill. The tests were based on the geotechnical characteristics, such as physical indexes, the Atterberg limits and bentonite content. Furthermore, it was observed the influence of particle size and mechanical tests such as compaction, permeability, absorption, retention, density, shear strength and test for broken were carried out. It was used the test of neutral leaching and leachate. The analyses followed the Brazilian Standards (NBR) and American Society (ASTM) procedures, specific for each test. To evaluate the environmental impacts arising from the use of conventional materials and FSW as layers of coverage, it was used the method of the network of interaction. From the results obtained we can conclude that the sample green sand (AV) was the most satisfactory. Although it has not achieved the requirements in the parameters which of the physical indexes. With this waste in landfill cover layers, it can be stated that it is possible to eliminate up to 12 of the environmental impacts from the use of clay soils.

1 INTRODUÇÃO

Muitos avanços vêm sendo alcançados nas indústrias relacionados à área ambiental, não somente devido às legislações impostas, mas também por comprovar inúmeras vantagens, destacando a redução de custos como a variável que mais desperta interesse do ponto de vista empresarial. Dentro das estratégias de desempenho ambiental para as indústrias o reaproveitamento e a aplicação são duas alternativas importantes que substituem materiais e reduzem o descarte de resíduos.

Uma importante função da ciência dos materiais é a pesquisa visando à substituição de materiais normalmente empregados por outros que possuam características semelhantes e sejam ambientalmente viáveis.

O setor de fundição tem um papel importante dentro da economia do país, apresentando também significativos impactos ambientais. Dentre os problemas ambientais do setor, a geração de resíduos é um dos mais importantes.

Os resíduos mais expressivos nas indústrias de fundição são as areias descartadas de fundição (ADF) que entram como insumo na montagem dos moldes para a fabricação de peças fundidas.

No Brasil é gerada aproximadamente uma tonelada de ADF por tonelada produzida de material de fundido produzido. [1] Em 2007 a geração de ADF chegou a 3 milhões de toneladas. [2] Nos Estados Unidos são geradas de 6 a 10 milhões de toneladas por ano e são avaliadas para reutilização em outros produtos usados por outras indústrias. Na Europa a quantidade descartada chega a 9 milhões de toneladas e em torno de 32% do resíduo é reaproveitado como sub-produto.[3]

Em se tratando de resíduos a primeira alternativa sempre será a sua não geração ou minimização, em seguida a reciclagem/reaproveitamento ou aplicação. A aplicação de resíduos sólidos como materiais alternativos traz inúmeros benefícios, mas para tanto, estes materiais devem apresentar características compatíveis com as dos materiais tradicionais.

Projetos de pesquisa indicam usos da ADF na construção civil para incorporação no asfalto, artefatos de concreto, cobertura de aterros, material de enchimento, remediação de áreas degradadas e corretivo do solo, entre outras.[4]

No processo de fundição existem duas diferenciações em relação às areias: areias verdes e areias ligadas quimicamente. A areia verde tem como constituintes principais a bentonita, pó de carvão e areia base (sílica-argilosa), enquanto que as areias ligadas

quimicamente possuem aditivos tais como catalisadores e resinas fenólicas. Devido a essas características, percebe-se que a areia verde de fundição possui qualidades de interesse para a incorporação em outros materiais, devido ao índice de bentonita. É devido a este índice que este resíduo se torna de interesse para estudos em camadas de cobertura de aterros.

Este trabalho tem como objetivo principal caracterizar geotecnicamente e ambientalmente as areias descartadas de fundição do tipo verde para aplicação como material alternativo em camadas de coberturas de aterros. Ensaio de laboratório foram conduzidos de acordo com as normas de mecânica dos solos, para duas amostras de ADF de uma indústria de fundição de metal ferroso.

Os ensaios se basearam nas características geotécnicas, tais como a índices físicos, limites de Atterberg, teor de bentonita. Além disso, foram observadas a influência da granulometria e os ensaios mecânicos tais como compactação, permeabilidade, absorção, retenção, adensamento, resistência ao cisalhamento, ensaio de trincas. Para a caracterização ambiental foi utilizado o ensaio de lixiviação.

Ainda, para analisar os impactos ambientais decorrentes da utilização de materiais convencionais e de ADF como cobertura utilizou-se o método da rede de interação.

Os benefícios desta aplicação atingem vários setores. As indústrias de fundição podem diminuir custos com a disposição final deste resíduo. Os órgãos ambientais se beneficiam uma vez que a geração de dados com base científica e idônea que deve preceder a autorização para aplicação do material podem auxiliar na tomada de decisões. Para o meio ambiente de uma forma geral a valorização de resíduo significa a diminuição da necessidade de extração de matérias primas e portanto menores impactos ambientais, ao mesmo tempo, que a não introdução deste material em aterros de resíduos também significa redução de riscos ambientais. Finalmente trata-se de uma contribuição à ciência dos materiais no estudo de um subproduto alternativo que potencialmente apresenta grande possibilidade de re-introdução.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria de Fundição

No cenário mundial o Brasil é o sétimo produtor de fundidos superando países como Itália, França e Coréia, sendo o primeiro lugar ocupado pela China. No ano de 2007 as indústrias ultrapassaram três milhões de toneladas produzidas. De sua produção 53% destina-se à indústria automotiva.[5]

O setor de fundição tem como atividade a fabricação de peças fundidas de metais ferrosos e não ferrosos. O processo de fundição consiste em dar a forma adequada ao metal, vertendo-o num molde, o qual tem a forma desejada. Os moldes conformam as fases externas e os machos são as cavidades internas das peças. O macho corresponde a uma peça de areia rígida, que tem a função de servir como um canal interno de passagem do metal fundido. Os moldes geralmente utilizados são de areia com características de interesse para determinados tipos de peças. Por isso é que ocorre uma grande geração de ADF nas indústrias de fundição que utilizam areia como matéria-prima para o processo de moldagem.[6][7]

2.2. Processo de Fundição

A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado da fabricação de fundidos e geração do resíduo de areia.

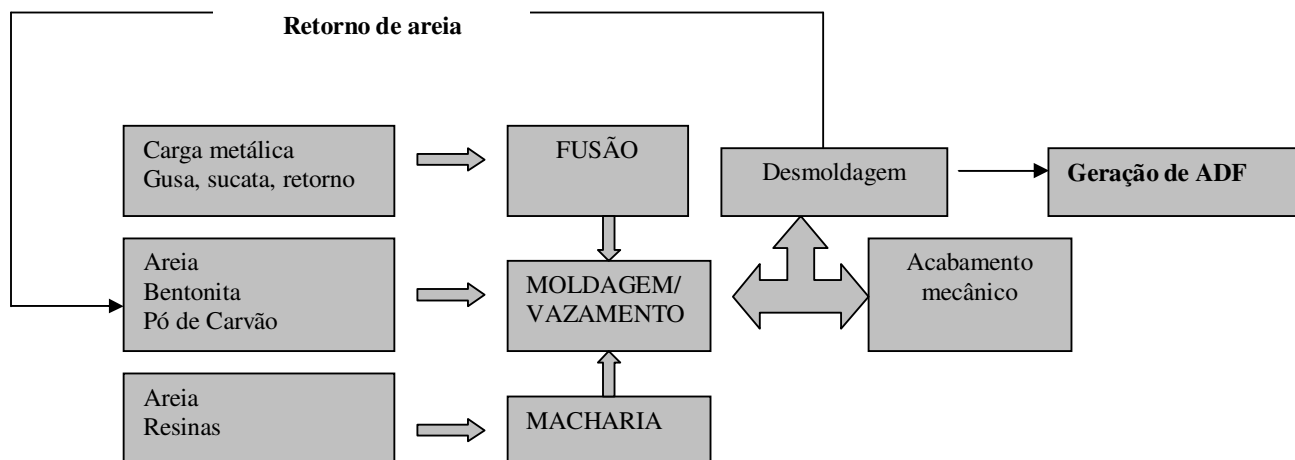


Figura 1: Fluxograma simplificado do processo de Fundição.

Os principais processos compreendem a fusão do metal, a moldagem em areia, o vazamento do metal e a fabricação de machos. O processo de desmoldagem é a fonte principal de geração de ADF.

Os sistemas de moldagem em areia em fundições de ferro utilizam duas tecnologias diferentes: uma que utiliza a moldagem feita com areia verde e a outra com areia sintética ou resinada.

A areia verde é formada por areia, bentonita e carvão mineral. O ligante químico para manter homogênea esta mistura é a água. O carvão mineral tem como função nesta mistura realizar o fechamento das camadas superficiais melhorando com isto o acabamento do molde.

A proporção de mistura dos componentes é característica de cada indústria de fundição. Em geral, é comum que cada constituinte fique dentro das seguintes faixas: de 2 a 10% da massa total de carvão mineral, 3 a 10% de material argiloso, geralmente bentonita, e de 3 a 4% de água.[7]

O molde em areia verde deve apresentar uma série de propriedades tais como distribuição de tamanhos de partículas, refratariedade, permeabilidade e coesão. O processo é contínuo. Toda matéria prima passa por um sistema de correias transportadoras e parte do material sempre retorna ao processo, a areia verde para o molde pode ser reusada desde que as propriedades mencionadas sejam atendidas.

O molde com a areia sintética se constitui de areia moldada com resina química que permite que haja o processo de moldagem e fixação por cura. As tecnologias químicas existentes para este processo podem ser com a cura realizada a frio, ou a quente.

Devido à aplicação do macho este deve ser resistente para que o metal fundido penetre no molde e capaz de se colapsar para retirada da peça após resfriamento. Para que atenda estas características resinas ou ligantes químicos são adicionados nas areias. Dependendo do tipo de ligação estes materiais podem ser adicionados pelo ar, por via catalítica ou térmica. Os processos mais conhecidos são moldagem shell que utiliza emulsão siliconada e resina com composto aromático, moldagem em caixa quente onde é utilizada resina fenólica e moldagem em caixa fria que necessita de um gás catalítico para a cura do molde. [7]

Como desvantagem deste sistema pode ser destacada a sua recuperação que consiste em desmanchar os torrões de areia criados no processo. Quando ocorre esta

recuperação, A resina é novamente agregada à massa. Outra desvantagem esta sediada na emissão atmosférica fenólica do agente químico utilizado para cura.

A Figura 2 ilustra uma caixa montada com areia de moldagem do tipo verde, macho e as cavidades onde após vazamento do metal fundido a peça será formada.



Figura 2: Molde de areia

Também ocorre a geração da ADF no retorno da areia, pois ocorre a separação do molde em torrões e o pó de areia que são descartados. No sistema de transporte de areia, observa-se a perda e na própria moldagem uma parte da areia acaba caindo devido ao excesso na caixa. E por fim no acabamento mecânico principalmente no processo de quebra de canal e limpeza das peças.

No Brasil, o destino final da ADF tem sido a disposição em aterros industriais, onde ocupam um volume elevado. Em relação à cadeia de impactos gerados pela destinação das ADF em aterros, podem ser observadas perdas tanto para o meio ambiente, quanto para empresas e a própria comunidade.

Em alguns países a ADF é tratada como um material passível de valorização e não como um resíduo gerado pelo processo. Depois da saída da indústria de fundição este material serve de entrada para as indústrias da construção civil. A Figura 3 apresenta as entradas e saídas de uma indústria de fundição.

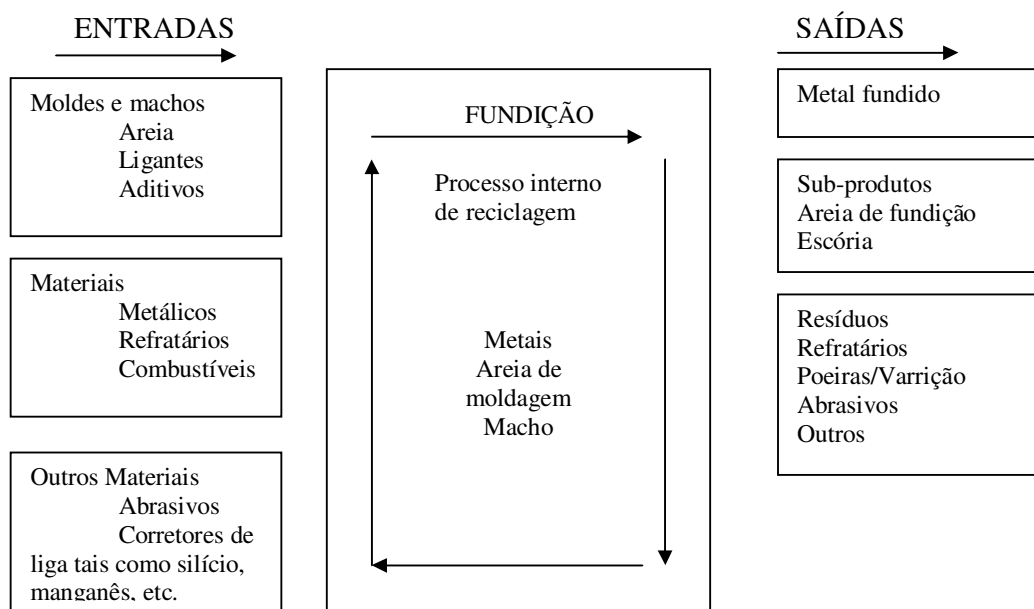


Figura 3: Saídas e entradas do processo de fundição.[8]

2.3 Características das ADF

As aplicações de um material estão diretamente ligadas às suas propriedades físico - químicas. Nesta seção são apresentadas as características das ADF publicadas em trabalhos que utilizaram este material.

A ADF é classificada, segundo a norma brasileira NBR 10.004, como um resíduo não inerte classe II-A, constituída por areia, agentes ligantes, carbono orgânico e partículas de ferro residual. A Tabela 1 traz referências sobre as características físicas e geotécnicas do material estudado.[9]

Tabela 1: Propriedades físicas e geotécnicas das ADF. [4][10][11][12]

Propriedade	Valores
Umidade	3-5%
Peso seco	110-115 (pcs)
Umidade ótima	8-12%
Coefficiente de permeabilidade	$1,8 \times 10^{-8} - 9,5 \times 10^{-9}$ cm/s
Limite de plasticidade	Em alguns casos não plásticas
Teor de bentonita	2-13%
Massa específica	2,50-2,73 g/cm ³

Geralmente este material apresenta umidade muito baixa e ausência de compostos orgânicos em função das altas temperaturas do processo produtivo. Por este motivo, faz-

se necessário a hidratação para “ativar” as ligações da bentonita, sendo necessário a adição de 10% de água.

O coeficiente de permeabilidade geralmente é baixo devido à presença da bentonita. Em relação aos limites de Atterberg normalmente as ADF sem finos são caracterizadas como não-plásticas e a plasticidade vai depender da quantidade de argila. As ADF que possuem em torno de 6 a 10% de argila podem apresentar limite de liquidez maior que 20 e índice de plasticidade maior que 2. [4] [10]

A classificação da ADF, segundo o sistema de classificação unificada do solos, pode ser SP (areia mal graduada), SM (solo siltoso) ou SPSM e pelo Sistema Rodoviário de Classificação com A-3 (areias finas), A-2-4 (Diâmetros de partículas menores que 2,0 mm). [10]

As ADF também possuem boa resistência ao corte sendo o ângulo de fricção muito semelhante aos de areias convencionais chegando a valores de 30° a 36°. O ensaio de resistência ao corte triaxial pode ser utilizado para o uso da ADF como camadas de aterros, o ângulo de fricção nestes casos pode chegar a 28° e coesão de 3700 pcfs.[10]

A Figura 4 apresenta os valores de compactação para ADF com 5 a 12% (4 a) de finos e para ADF com 0 a 5% de finos (4 b). Pode-se observar os picos em 110 pcfs num percentual de finos de 12%.

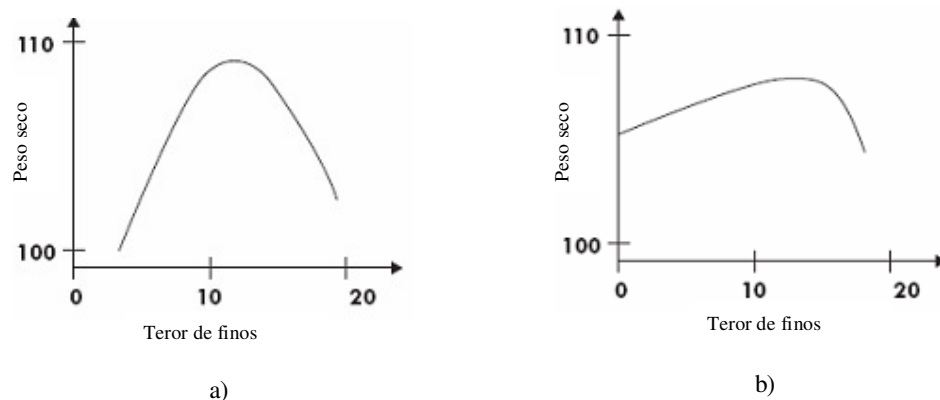


Figura 4: Compactação para ADF a) 5 a 12% de finos e b) 0 a 5% de finos [10]

Em relação à composição da ADF, em difratogramas da ADF do tipo verde, pode ser observado o pico de maior expressão nos compostos SiO_2 e Fe_2O_3 o que mostra a similaridade com os difratogramas das argilas. [11]

O teor de metais é uma característica importante das ADF e por este motivo tem sido alvo de muitos trabalhos em especial nos Estados Unidos. Isto se deve ao fato de

existir regulamentações nos estados americanos para o reaproveitamento de resíduos. Um ensaio que tem sido solicitado pelos órgãos ambientais é o TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) para definir a periculosidade do resíduo. Se o extrato apresentar contaminantes acima do regulamento definido pela *Environmental Protection Agency* (EPA), para os metais: Arsênio (As), Argônio (Ar), Bário(Ba), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Mercúrio (Hg), Chumbo (Pb) e Selênio(Se) e alguns compostos orgânicos, então o resíduo é considerado tóxico para o meio ambiente. [3] [13]

De acordo com o TCLP muitas ADF (especialmente areias de moldagem de fundições de ferro) não são caracterizadas como perigosas, entretanto outros resíduos de fundições de metais não-ferrosos podem apresentar características perigosas. Em um estudo em que foram avaliadas 43 amostras de ADF de fundição de ferro e metais não-ferrosos foi concluído que 9 amostras de areia apresentaram As, Ag, Ba, Cd, Cr e Pb acima do regulamento americano, caracterizando estas amostras como materiais tóxicos e impróprios para uso no solo. [3][13]

As ADF também podem ser utilizadas para correção do solo, devido ao teor de ferro e para melhorar a granulometria. Entretanto alguns constituintes como os metais pesados e resinas presentes em areias sintéticas de machos podem causar impactos em microrganismos presentes no solo. Apesar deste risco, um estudo avaliou a atividade da enzima dehidrogenase (DHA) como indicador ambiental para avaliar a aplicabilidade das ADF em solos. Foram avaliadas ADF provenientes de fundições de cobre, alumínio e ferro. O resultado mostrou que nas ADF de fundições de alumínio e ferro não houve impacto significativo na DHA. [13]

Além dos metais, podem estar presentes nas ADF compostos orgânicos como os hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH) como o fenol e o formaldeído provenientes das resinas utilizadas nas areias sintéticas para fabricação dos machos. Numa pesquisa realizada com 10 amostras de ADF de metais ferrosos e não-ferrosos houve a ocorrência de PAH em 30% das amostras, sendo o Naftaleno o principal hidrocarboneto encontrado.[14]

Todas as características apresentadas dependem de vários parâmetros oriundos da produção, sendo os principais a durabilidade, a composição química e a variabilidade das ADF.[10]

2.4 Argilominerais presentes na areia de fundição

Os principais materiais que formam o molde de areia são sílica, carvão e bentonita, no caso das areias verdes. A bentonita é um argilomineral de larga utilização como aglomerante em areias de fundição, pelletização de minério de ferro, nos fluidos de perfuração de poços da indústria petrolífera, agente absorvente ou clareador, na indústria farmacêutica, na remoção de poluentes de água e em cosméticos. No Brasil, a produção da bentonita está concentrada no estado da Paraíba.[16]

Sua função no molde de areia é de elemento ligante da mistura. A bentonita é o aglomerante da areia base, que na presença de água interlamelar aumenta as forças de ligação entre as lamelas de bentonita, dando maior resistência aos moldes. Possui características de impermeabilização, capacidade de expansão e baixa permeabilidade. A afinidade da bentonita com a água e sua capacidade de expansão são as características que tornam o material resistente à passagem de água. [16]

A estrutura cristalina deste argilomineral pode ser constituída por dois tipos de folhas: as tetraédricas e as octaédricas. Nas folhas tetraédricas o cátion silício está ligado a quatro átomos de oxigênio. Os tetraedros vizinhos compartilham três átomos de oxigênio. [17]

No caso das folhas octaédricas os cátions alumínio ou ferro ou magnésio estão ligados a seis hidroxilas. A folha octaédrica ocupa a posição intermediária entre as duas folhas tetraédricas, que se orientam com os ápices dos tetraedros convergindo para a folha octaédrica. [17]

A estrutura deste minério é lamelar, pois os tetraedros de sílica estão ligados através dos cátions sódio e cálcio e de moléculas de água. As ligações são fracas, mas existe uma forte ligação dentro das camadas que garante as características das argilas. A Figura 5 apresenta a estrutura tri-dimensional da bentonita.

Por possuir esta estrutura a bentonita apresenta grande área superficial em torno de 600 a 800 m²/g e é considerado um material nanoparticulado, pois em relação à sua microestrutura cada partícula lamelar da bentonita tem dimensões de 100 a 200nm de comprimento por 1nm de largura. [16]

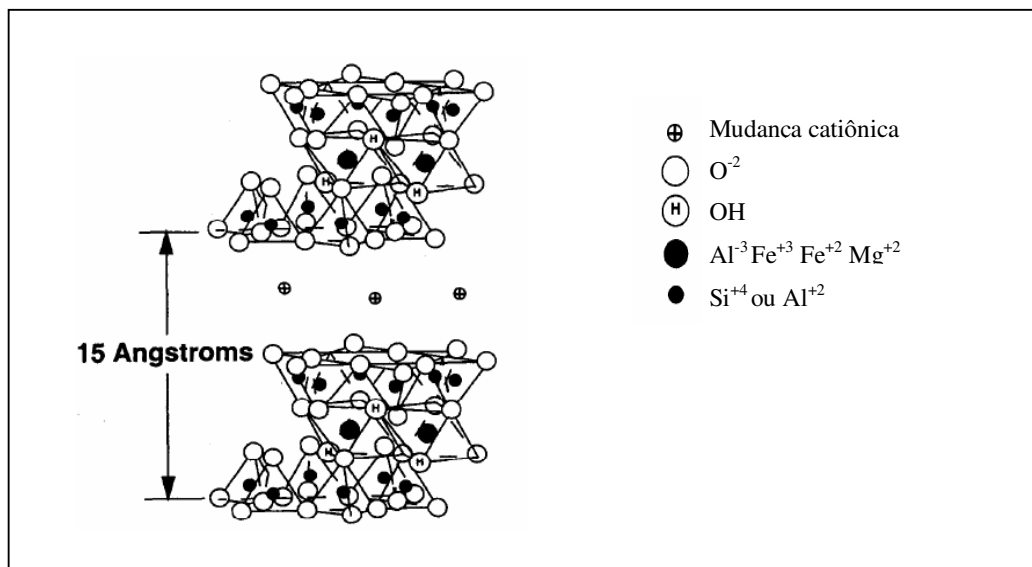


Figura 5: Estrutura tri-dimensional da bentonita.[18]

A baixa permeabilidade da bentonita se deve à retenção eletrostática da água e também devido à sua granulometria que apresenta grande quantidade de material fino, geralmente inferiores a 4 μm . Também ocorre a aderência dos poluentes nas partículas devido a maior área superficial nas partículas mais finas. [16] [17]

A bentonita apresenta predominantemente a argila montmorilonita que é formada pelos minerais esmectitas, ilita, clorita e caulinita. A montmorilonita tem como característica principal a tendência em expandir-se e hidratar-se quando em contato com a água. A principal causa do processo de inchamento é a hidratação dos cátions trocáveis que residem entre as camadas negativamente carregadas que formam suas estruturas cristalinas. [17]

Além da baixa permeabilidade, a bentonita tem como características a capacidade de troca de cátions, elevada plasticidade e elevada afinidade com a água assim possuindo uma alta capacidade de expansão ou inchamento. A capacidade de troca catiônica (CTC) é semelhante à que ocorre com as zeolitas naturais. Por este motivo a bentonita vem sendo estudada com a finalidade de tratamento de efluentes no que tange a remoção de íons de metálicos. A CTC da bentonita é alta devido à presença da esmectita que apresenta CTC em torno de 80 a 150 meq/100 g, uma das mais altas dos argilominerais. Para a caulinita, por exemplo, a CTC está em torno de 3 a 15 meq/100 g. [17][20][21]

Entretanto para a aplicação da bentonita como um material sorvente visando o tratamento de efluentes, faz-se necessário realizar um processo chamado homoionização

para homogeneizar os cátions superficiais. Isso é porque este material possui uma baixa acumulação de íons metálicos podendo limitar a capacidade do uso para remoção de poluentes.[21]

A capacidade de adsorção de água está associada ao espaço entre as intercamadas que, dependendo do cátion, é de 9,8 a 15 Å, com moléculas de água aderidas que na presença de água que é bipolar invade o espaço entre as camadas expandindo o mineral e adsorvendo grandes porções de água. [17][22]

Em função destas propriedades de baixa permeabilidade e alto CTC, este argilomineral também está se destacando no uso como barreiras projetadas nos sistemas de deposição de resíduos pois consegue criar uma zona impermeável de melhor qualidade ao redor do resíduo devido ao inchamento ocasionado pela bentonita.[22]

Vários estudos apontam a utilização da bentonita como aditivo na cobertura de aterros. A adição de porcentagens de bentonita até 14% seria suficiente para reduzir a permeabilidade a níveis aceitáveis. Sob condições confinadas, assim como em cobertura de aterros, as partículas expandidas da bentonita são forçadas umas contra outras, preenchendo os vazios entre as partículas de solo e formando uma barreira contra a passagem de fluido. Se conservada em estado úmido, a bentonita nunca solidifica ou endurece, e mantém sua condição impermeável indefinidamente. A bentonita funciona melhor para a aplicação em barreiras hidráulicas quando utilizada uniformemente e em pequenas quantidades, entre 3 a 8%.[22]

Durante o processo de vazamento do metal líquido no molde os materiais que o compõem sofrem um super aquecimento que pode provocar uma decomposição térmica da bentonita e do pó de carvão mineral que envolve o grão de areia, podendo com isso perder as propriedades originais. Desta forma é necessário avaliar as propriedades da ADF para verificar sua aplicação em camadas de cobertura de aterros.

O Brasil importa a bentonita sódica, pois atualmente não há reservas deste bem mineral e a produção, por conseguinte, somente pode ser obtida pela ativação do produto bruto. As bentonitas produzidas no Brasil são do tipo cálcicas. As reservas de bentonita brasileiras medem aproximadamente 27,5 milhões de toneladas em 2007 e a produção estimada de bentonita bruta no Brasil atingiu 329.647 toneladas no ano de 2007. [23]

Em relação às argilas comuns, o Brasil possui uma reserva de cerca de 6 bilhões de toneladas estimadas no ano de 2006 e com uma produção de 22 milhões de toneladas neste mesmo ano. No Rio Grande do Sul em 2006 estimou-se existir uma reserva de 54

milhões de toneladas de argila com uma produção estimada em 2 milhões de toneladas. [24]

2.5 Gerenciamento de resíduos de ADF

As ADF constituem um problema importante para o setor de fundição devido à grande quantidade gerada e ao custo para disposição deste resíduo.

Por isso, muitos estudos são realizados a fim de aplicar este material como um sub-produto. No Brasil a geração de ADF chegou a 3 milhões de toneladas no ano de 2008, nos Estados Unidos e Europa a geração chega a 10 milhões e 9 milhões de toneladas anuais, respectivamente. [2] [3]

Na Figura 6 é apresentado o fluxograma de um sistema de gerenciamento de resíduos. A primeira alternativa é a redução da geração na fonte ou minimização que visa reduzir ao máximo possível a quantidade de resíduos a ser tratada ou disposta.[25]

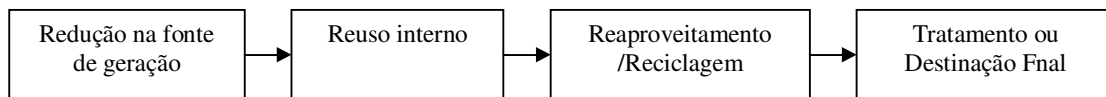


Figura 6: Fluxograma do gerenciamento de resíduos.

Por reuso de resíduos entende-se um processo de reaplicação dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química. Já o conceito de reciclagem difere-se como um processo de transformação dos resíduos sólidos, dentro de padrões e condições estabelecidas pelo órgão ambiental, que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, tornando-os novos produtos, na forma insumos, ou em rejeito.[26]

O destino final compreende em diversas aplicações, no caso da ADF, aterros, aplicação na construção civil ou outras conforme descrito no decorrer do texto.

Para o reuso interno de ADF, é necessário obter a recuperação da areia no mesmo processo de fabricação. É necessário que ocorra a retirada de material de granulometria fina e grosseira (torrões), prejudicial para a aglutinação dos componentes da mistura e de resíduo gerados pelos caroços de machos introduzidos no processo conforme a tecnologia de fundição.

Geralmente o reuso da ADF ocorre para a reconstrução das painelas de vazamento de metal. Os revestimentos das painelas utilizados, normalmente, são confeccionados com areia, bentonita e silicato de sódio que é um excelente agregador e possui uma alta resistência a temperaturas de vazamento. Como as painelas ficam extremamente incrustadas de escória torna-se mais fácil, rápido e barato confeccioná-las com areia usada do que com material refratário usualmente utilizado em fundições.

Muitas indústrias de fundição utilizam o processo de regeneração para reciclar as ADF. Este processo é indicado somente para alguns tipos de ADF, especialmente para aquelas com resina. As regenerações de areia compreendem: mecânica, úmida, térmica e química (também conhecido como processo Fenton).[27]

No Brasil a destinação das ADF é a disposição em aterros industriais, mas as possibilidades de aplicação estão sendo ampliadas através das várias aplicações da ADF que vêm sendo pesquisadas. Nos Estados Unidos estima-se o reaproveitamento de aproximadamente 500.000 a 700.000 toneladas de areia de fundição por ano em projetos de engenharia civil. Na Tabela 2 podem ser observadas as aplicação já realizada das ADF em diferentes países. [28]

Tabela 2: Aplicação da ADF em alguns países. [30][3]

País	Aplicação
Alemanha	Mistura asfáltica e construção civil
Austrália	Produção de cimento, concreto e tijolos, mistura asfáltica e corretivo de solo
Bélgica	Subproduto para construção civil como estradas, fabricação de cimento e tijolos
Dinamarca	Material de enchimento, material para base e sub base de pavimentação
Finlândia	Aditivo para compostagem
França	Mistura asfáltica
Suécia	Cobertura final de aterros e camadas internas de drenagem
Estados Unidos	Remediação de solos degradados.
Brasil	Incorporação em camadas de asfalto, concreto e tijolos.

A Tabela 3 traz um resumo dos principais estudos de aplicação de ADF que representam a fase 4 do fluxograma da Figura 6. A aplicação em camadas de cobertura será detalhada no item 2.5.1.

Tabela 3: Breve descrição entre as aplicações das ADF.

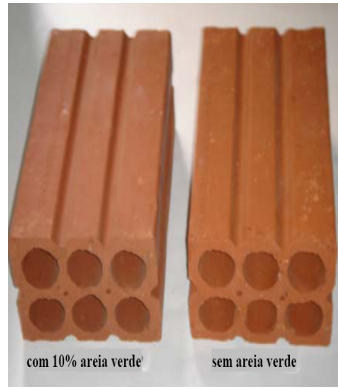
Aplicação	Breve descrição
<p>Artefatos de concreto Figura 7 a)</p>	<p>O artefato de concreto pode ser definido como um artefato de cimento composto com agregados, água e aditivos, que garante a forma estética e o desempenho estrutural e durabilidade. Como exemplos podem ser citados: lajes e pré-lajes pré-fabricadas, tubos e canaletas, balaustres, etc. A utilização da ADF substitui a areia virgem ou pó de brita na mistura dos finos do concreto podendo ser incorporada em torno de 8% a 22% da mistura. As pesquisas indicam que com a adição da ADF na mistura traz resultados satisfatórios nas propriedades do concreto. [2]</p>
<p>Artefatos cerâmicos Figura 7 b)</p>	<p>Por artefato cerâmico entende-se como um composto inorgânico obtido através da queima (sinterização) de argilominerais, com ou sem carga, para fabricação de artefato sólido, de alta resistência mecânica à compressão e geralmente, baixa resistência à flexão (quebradiço). Estudos comprovaram que com até 10% de incorporação do resíduo ADF do tipo verde pode ser incorporado como substituição do agregado fino, como fonte de sílica, sem que o material perca as propriedades. A discussão acerca desta reutilização está no fato de que muitos artefatos são utilizados para moradias estando diretamente em contato com o ser humano. Embora algumas ADF estão isentas de compostos perigosos como o fenol, aquelas que apresentam este composto podem ser inviabilizadas para este fim. Foi por este motivo que as normas de discussão sobre o assunto estão exigindo em alguns casos, e dependendo do projeto, os ensaios de toxicidade crônica. [29]</p>
<p>Pavimentação asfáltica Figura 7 c)</p>	<p>A incorporação em massa asfáltica foi um dos primeiros estudos a serem pesquisados no país, através da substituição do agregado fino principalmente utilizado na camada asfáltica. No Brasil existem três trechos experimentais registrados de pavimentação asfáltica que utilizaram areia de fundição em substituição à areia nova. Os estudos mostraram-se satisfatórios em pavimentos com misturas betuminosas usinadas a quente, incorporando entre 7% a 15% na camada do asfalto (CBUQ). Nos EUA os estudos de substituição da ADF encontram-se em faixas de 8 a 25%. Como a porcentagem de utilização do resíduo na camada asfáltica é pouco significativa iniciaram as pesquisas para incorporação da areia na sub-base da massa asfáltica. No exterior chegou-se a incorporar 100% de ADF na sub-base de um asfalto, demonstrando resultados satisfatórios, principalmente numa melhor resistência em condições de inverno. Um estudo realizado em São Paulo apresentou a possibilidade de incorporação de ADF do tipo resinada como base e sub-base de asfalto o que representaria um maior volume. Os resultados mostraram que a utilização de até 60% de ADF é possível mantendo-se os quesitos necessários para a massa de asfalto. [3]</p>

(continuação)

Aplicação	Breve descrição
Recuperação de áreas degradadas	Um estudo realizado em uma água subterrânea contaminada com Tricloroetileno (TCE) mostrou que a ADF pode ser usada como meio reativo. Para este tipo de composto além de contaminações com metais pesados e herbicidas normalmente são utilizados materiais granulares com ferro na valência zero (Fe^0), meios adsortivos como o composto Zeolitas, normalmente usado para remediação de áreas degradadas. Os resultados mostraram que este material tem uma alta capacidade de sorção de TCE com valores de coeficientes de partição variando entre 4 a 41,6 l/kg. Assim a pesquisa concluiu que a ADF pode ser utilizada como meio reativo devido a presença de ferro que age como um agente redutor e pelo carbono orgânico como o que funciona como o agente mecanismo do fenômeno de sorção.[32][30]
Material de enchimento e leito fluidizado Figura 7 d)	A ADF também é bastante apropriada para ser utilizada como fluido de preenchimento, no espaço entre tubulações subterrâneas, por ser um material semelhante ao concreto e com baixa resistência. A incorporação da ADF pode ocorrer em leito fluidizado também conhecido como material controlador de baixa resistência. Os componentes dos leitos fluidizados geralmente são bases de cimento (cimento ou cinzas de carvão), agregados finos (areia e cinzas de carvão), água ou misturado de componentes químicos. Todos estes componentes devem conferir as propriedades de capacidade de fluir, segregação, marcação do tempo, permeabilidade e ganhos de resistência. No estudo em específico a ADF foi reaproveitada substituindo os agregados finos em um leito fluidizado e foi observado se o efluente e as capacidades geotécnicas do leito modificavam s utilizado a ADF. Como conclusão o efluente gerado do leito fluidizado utilizando a ADF não apresentou valores acima do permitido pelos regulamentos da Environmental Protection Agency (EPA) nem tanto a capacidade geotécnica alterou as propriedades do leito. Neste estudo foram utilizadas 56% de ADF na mistura.[28]



a) Utilização da ADF em artefatos de concreto.[2]



b) Experimento com ADF em artefatos cerâmicos [29]



c) Pavimentação asfáltica [3]



d) Material de enchimento [28]

Figura 7: Aplicações das ADF

2.5.1 Aplicação da ADF como cobertura de aterro

A partir do ano de 1980, iniciaram as pesquisas nos Estados Unidos e na Europa sobre a utilização das ADF em cobertura de aterros. Os parâmetros mais importantes apontados eram: distribuição granulométrica, curva de compactação e permeabilidade. Após os ensaios foram encontrados valores de permeabilidade variando de $1,3 \times 10^{-6}$ a $6,1 \times 10^{-6}$ m/s. [12]

Uma pesquisa realizou cinco coberturas de aterros em escala piloto para teste, dois construídos com material argiloso e três com as ADF. Por quatro anos o percolado foi coletado. A taxa de percolação da cobertura de aterros com a ADF foi duas vezes menor do que a taxa de percolação das coberturas com material argiloso. Para explicar o fato os pesquisadores escavaram as camadas e verificaram que o material argiloso foi

quebrado pela ação do frio e redução da umidade, aumentando diretamente a permeabilidade, o que não ocorreu com as coberturas de ADF. [12]

A permeabilidade das ADF decresce rapidamente com o aumento da quantidade de bentonita de 0 a 8%. Acima de 8% o valor a permeabilidade torna-se comparável ao valor da permeabilidade da bentonita. Esta característica vai depender do tipo de bentonita presentes no material.

Como nas ADF é esperado um o teor de umidade baixo, autores indicam que este parâmetro não é um fator crítico para a construção de cobertura de aterros. Entretanto outros estudos apontaram que a quantidade de água pode afetar a permeabilidade das ADF pois afeta a distribuição da bentonita.[11]

Pesquisadores avaliaram locais de altas e baixas temperaturas onde o solo pode secar, aumentando a permeabilidade. Os fenômenos estudados foram os ciclos de umedecimento-secagem e congelamento-aquecimento. Concluíram que a hidratação da ADF evitaria estes fenômenos. [11]

Uma pesquisa realizada no Rio Grande do Sul, propôs a utilização da areia verde com solo e entulho da construção civil como camadas de cobertura intermediária de aterro sanitário, com vistas a facilitar a recirculação de lixiviados. Para este estudo utilizou-se bombonas de PEAD de 30 L preenchidas com resíduos sólidos domésticos (R.S.D) semelhante a um bioreator e foram analisados a quantidade de lixiviado gerado e a umidade das camadas. A quantidade de bentonita da areia utilizada era de 8,2 % .[33]

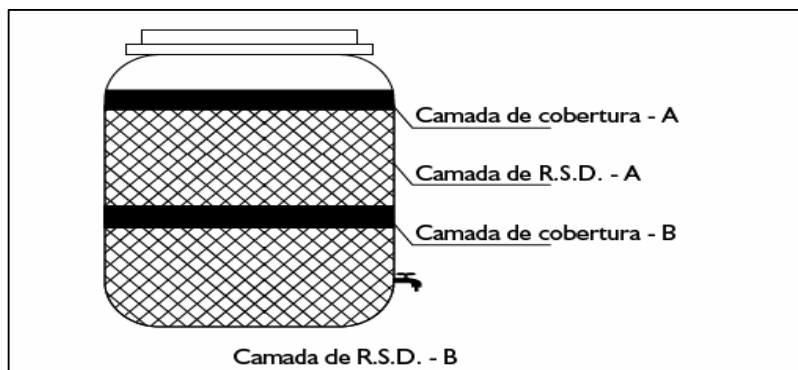


Figura 8: Esquema da pesquisa utilizando três tipos de camadas [33]

Os resultados mostraram que quando a camada intermediária foi o solo ou a areia de fundição, os resíduos sólidos na camada B estavam mais secos, indicando que a camada intermediária não permitiu boa recirculação do lixiviado. A areia usada de

fundição teve um comportamento intermediário, tanto para camada intermediária quanto para camada final, comparada com os dois outros materiais, demonstrando assim boa potencialidade de uso. O trabalho é finalizado com a sugestão de realização de maiores estudos para avaliar o comportamento da ADF, quanto à retenção de metais pesados, e ao uso de areias com diferentes granulometrias e teores de argila. [33]

2.6 Aterros de resíduos sólidos

Atualmente no Brasil, o maior índice de destinação final de resíduos sólidos tanto industriais como urbanos ainda é o aterro. Segundo estudo do IBGE em 2000, aproximadamente 47,1% dos resíduos sólidos domésticos eram destinados a aterros sanitários, já o restante corresponde ao destino a aterros controlados e lixões. Este resultado mostra que ainda há necessidades de saneamento em muitos municípios brasileiros, pois os impactos ambientais gerados pela má destinação de resíduos sólidos domésticos podem causar danos sérios às populações e ao meio ambiente.[35]

Em relação à destinação de resíduos industriais os aterros também são utilizados para disposição final destes resíduos. Um estudo realizado no Estado do Rio Grande do Sul mostrou que 37% e 23% dos resíduos Classe I são enviados para centrais de resíduos e aterros industriais, respectivamente. Em relação aos resíduos Classe II 53% são encaminhados para reciclagem e reutilização enquanto 7% são encaminhados para aterros industriais. Isso mostra que as tecnologias para reutilização e reciclagem devem ser fomentadas para que os resíduos tenham uma solução ambientalmente segura e correta, aliado às questões financeiras e de responsabilidade do gerador.[36]

Um aterro sanitário ou industrial consiste numa técnica para disposição de resíduos, sem causar prejuízo ao meio ambiente e sem causar perigo à saúde humana, método este que utiliza princípios de engenharia, para confinar os resíduos na menor área possível, reduzindo o seu volume ao mínimo praticável.[37]

2.6.1 Camadas de cobertura de aterros

As Normas Brasileiras NBR 13896 e NBR 10157 consideram que o aterro deve ser construído com sistemas de impermeabilização (camadas ou coberturas) o que consiste na deposição de camadas de materiais artificiais ou naturais, que impeçam ou reduzam substancialmente a infiltração no solo dos líquidos percolados, através da

massa de resíduos. Ainda considera que a camada impermeabilizante deve ser composta de solo homogêneo com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s.[38] [39]

O sistema de camadas pode ser definido, ainda, como algum material que tem como funções produzir uma barreira física de forma horizontal impermeável, servir como proteção ambiental do solo onde não exista a percolação dos líquidos gerados na decomposição do material depositado e apresentar características de resistência e estabilidade no acondicionamento dos resíduos. [41]

Um sistema de impermeabilização deve apresentar as seguintes características:

- ✓ estanqueidade;
- ✓ durabilidade;
- ✓ resistência mecânica;
- ✓ resistência a intempéries;
- ✓ compatibilidade com os resíduos a serem dispostos. [42]

O sistema de camadas ou coberturas consiste em três compartimentos, revestimentos do fundo e camadas intermediárias e final. A Figura 9 apresenta um esquema de um aterro .

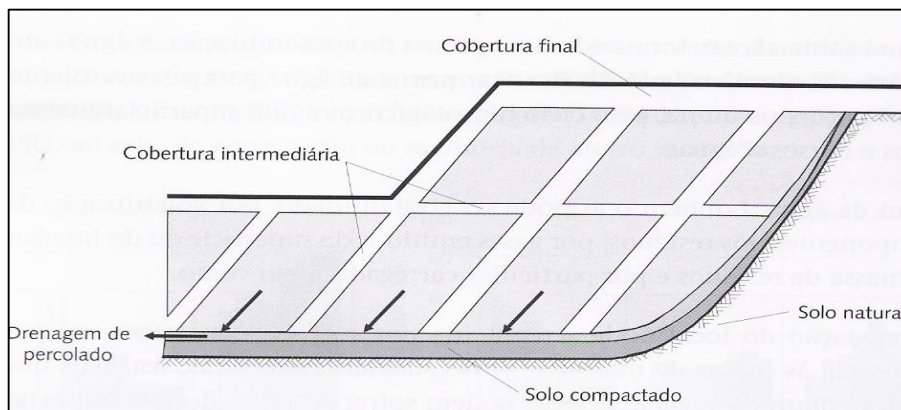


Figura 9: Esquema de um aterro com os sistemas de revestimento de fundo e coberturas [43]

A conformação final das camadas de cobertura dos aterros vai depender do tipo do aterro, do seu tamanho, da sua operação, do tipo de resíduo e das características locais e dos materiais à disposição. Estima-se que a quantidade de solo de cobertura e camadas intermediárias corresponde de 10 a 20 % do volume de aterro. [42]

Várias camadas fazem parte das coberturas de fundo e final. A Figura 10 apresenta um modelo de revestimento de fundo e cobertura final.

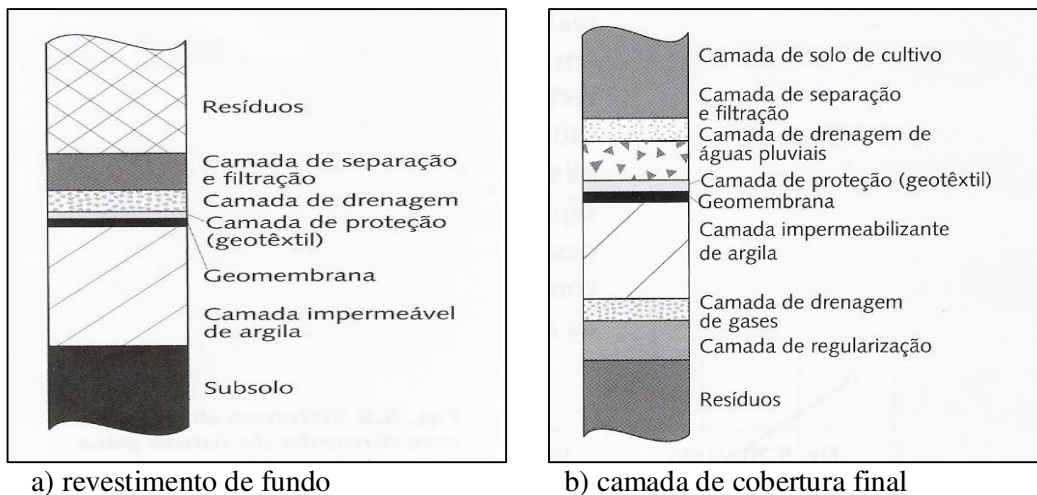


Figura 10: Revestimento de fundo e camada de cobertura[43]

A Figura 10 a) apresenta o revestimento de fundo composto por: camada impermeável, geomembrana, camada de proteção, camada de drenagem e camada de separação ou filtração e camada de resíduos.

A Figura 10 b) apresenta uma ilustração do sistema de cobertura final de um aterro. Este sistema é composto pelas seguintes camadas: cultivo, separação e filtração, drenagem de águas pluviais, proteção de membrana, impermeabilização, drenagem de gases e regularização.

2.6.1.1 Revestimento de fundo

O revestimento de fundo tem como prioridade reduzir o transporte de poluentes para o meio ambiente e é basicamente composto pela camada impermeabilizante, drenagem e transição.

A Tabela 4 ilustra os materiais utilizados para as camadas no revestimento de fundo.

Tabela 4: Materiais utilizados para as camadas no revestimento de fundo. [44]

Camadas	Tipo de material
Camada impermeável	Solo compactado com coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 1×10^{-9} m/s.
Barreira	Geomembrana
Proteção	Geotêxtil
Drenagem	Areia e cascalho
Separação e Filtração	Solo com granulometria intermediária entre solo de vegetação e da camada drenante

A camada de drenagem permite a coleta de percolado para tratamento, além de reduzir a carga hidráulica sobre a barreira. [45]

Os sistemas de impermeabilização inferior podem ser simples, compostos ou duplos. Sistemas simples são construídos com apenas uma camada, geralmente de argila compactada (também pode ser com somente uma camada de geomembrana). Os sistemas compostos são construídos por duas camadas sobrepostas de diferentes materiais, geralmente uma camada de argila compactada mais uma geomembrana sobreposta, supondo-se uma perfeita aderência entre geomembrana e a argila. Um sistema composto funciona como uma única camada. Já os sistemas duplos são construídos com duas camadas espaçadas por material drenante (geralmente o material drenante é areia ou uma geomalha) que tem por finalidade detectar e coletar os líquidos ou gases que porventura venham a passar pela camada impermeabilizante imediatamente acima. A camada impermeabilizante geralmente possui espessura de 60 a 100 cm. [42] [45]

2.6.1.2 Cobertura intermediária

As camadas intermediárias são usadas normalmente como coberturas necessárias à operação do aterro, mas podem servir para isolar células e melhorar a estabilidade do aterro. Além disso, esta camada tem como função principal o controle de vetores, evitar o espalhamento de resíduos pelo vento e fornecer suporte ao meio de transporte. Atualmente é comum a utilização de qualquer tipo de solo para a camada intermediária. [42]

2.6.1.3 Cobertura final

Sistemas de cobertura final são diferentes de sistema de impermeabilização da base pois eles promovem uma barreira para a água e não para o lixiviado. A cobertura final deve minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita à erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural do aterro. [42]

A resistência química requerida para a cobertura é, portanto menor que a requerida para sistemas de base. Entretanto, sistemas de cobertura são mais suscetíveis a questões de durabilidade e exposição a elementos, como a ressecamento da argila, erosão,

escavação por animais, e penetração de raízes. Também, devido à alta compressibilidade dos resíduos urbanos, os sistemas de cobertura devem ser suficientemente flexíveis para resistir aos danos causados por potenciais grandes adensamentos diferenciais. A cobertura final deve ter no mínimo 60 cm de espessura e de 3 % a 5% de inclinação. [45]

Atualmente para a utilização como cobertura de aterros vêm sendo utilizados os seguintes materiais: solo compactado, cobertura de aterros compósitos, ou os GCLs (Geosynthetic Clay Liners), com utilização de membranas flexíveis intercaladas com camadas de argila. A camada de argila entre as membranas constitui normalmente de bentonita devido a sua baixa condutividade (10^{-9} m/s), pelas facilidades de instalação e delimitação da espessura da camada. Entretanto devido às características da bentonita principalmente referente à troca catiônica e pelas reações em contato com a água é necessário que estes dados sejam levantados no projeto de cobertura. [22]

Os materiais utilizados para cobertura são categorizados de acordo com a camada, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Materiais utilizados para cada camada de cobertura. [44]

Camadas	Tipo de material
Solo de cultivo	Solo característico da área do aterro
Separação e Filtração	Solo com granulometria intermediária entre solo de vegetação e da camada drenante
Drenagem	Areia e cascalho
Proteção	Geotextil
Barreira	Geomembrana
Impermeabilizante	Solo compactado com coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 1×10^{-9} m/s.
Drenagem de gases	Material granular
Regularização	Solo não nobre

A camada de barreira é utilizada para restringir o movimento de líquidos dentro do aterro e o lançamento de gás pela cobertura. Assim camada de proteção é usada para proteger as camadas drenante e de barreira.

A camada de drenagem é utilizada para o transporte da água da chuva e a água do derretimento da neve para que não haja pressão da água sob a camada de barreira. Após, a camada filtrante ou de separação tem como função uniformizar a granulometria entre a camada de superfície e a drenante e por fim a camada de superfície é utilizada para contornar a superfície do aterro e suportar a vegetação.[45]

A camada de barreira é a que desempenha a função mais importante. As argilas podem ser utilizadas como camada de barreira, porém devem ter sobre esta uma ou mais camadas de geomembrana.

As normas brasileiras de aterros sanitários não exigem a instalação de geomembranas na base. Entretanto, muitos órgãos ambientais têm feito esta exigência para o licenciamento de aterro em condições específicas. O uso da geomembrana tem como vantagem principal a maximização da captação de biogás, e como desvantagem a diminuição de umidade no aterro. Por isso as coberturas que possuem este material utilizam o sistema de recirculação do percolado abaixo da geomembrana. [42]

As camadas de cobertura final podem ser classificadas como coberturas convencionais ou resistivas, coberturas evapotranspirativas e as barreiras capilares. [46]

Normalmente utilizam-se as barreiras resistivas, onde a infiltração de líquidos é reduzida por meio da construção de uma camada de solo compactado, geralmente o solo argiloso. Outra alternativa para cobertura são as camadas evapotranspirativas que apresentam uma camada de solo disposto sob condições naturais e uma cobertura vegetal com plantas nativas. E por fim, as barreiras capilares construídas por solos finos depositados sobre uma camada de solo granular, geralmente areia ou cascalho. [46]

A camada de argila é fundamental para o desempenho do sistema composto, assim além da baixa permeabilidade requerida os requisitos desta camada também são a compatibilidade química com os poluentes, alta capacidade de retenção de poluentes, baixo coeficiente de difusão, alta capacidade de suporte e baixa compressibilidade. [43]

As barreiras verticais também são utilizadas na impermeabilização de aterros com a finalidade de bloquear fluxos laterais, através da formação de barreira impermeável ao redor do aterro mantendo os níveis de água, separação de fluidos, rebaixamento do nível d'água e para permitir a escavação. Podem ser constituídas de argila compactada, formadas por parede diafragma de cimento-bentonita, solo-bentonita, concreto ou suspensão de bentonita, entre outros elementos. [43]

2.6.2 Propriedades geotécnicas das coberturas de aterros

As propriedades do solo são necessários a se conhecer para a construção de um aterro. Este conhecimento é essencial para o desenvolvimento do projeto, implantação e operação dos aterros.

O solo utilizado na construção das camadas de cobertura de aterros é o argiloso devido às suas características. Porém estes devem ser observados, pois ao secar podem apresentar trincas baixando com isso a sua permeabilidade. [43]

Um solo argiloso, para ser considerado adequado como impermeabilização de aterros, deve atender às seguintes características[42][47]:

- ✓ ser classificado como CL, CH, SC ou OH, segundo sistema unificado de classificação de solo (ASTM D2487-00);
- ✓ apresentar uma porcentagem maior do que 30 % de partículas passando pela peneira no 200 da ASTM (Análise de Granulometria por Peneiramento e Sedimentação conforme NBR 7181/84);
- ✓ apresentar limite de liquidez maior ou igual a 30 % (conforme NBR 6459/84);
- ✓ apresentar índice de plasticidade maior ou igual a 15 (conforme NBR 7180/84);

Percebe-se que a seleção dos materiais para a camada impermeabilizante baseia-se na porcentagem de argila ou de finos, no limite de liquidez, índice de plasticidade e na permeabilidade.

Com relação aos parâmetros físicos requisitados para cada tipo de camada podem-se levantar alguns aspectos. A variável mais significativa da construção da cobertura de aterro é a permeabilidade. Estudos afirmam que o solo deve ser pouco permeável, ou seja, o valor de permeabilidade não deve exceder 10^{-7} m/s ou 10^{-9} m/s com vistas a reduzir as possibilidades de contaminação do aquífero. As áreas selecionadas para construção do aterro devem ter características argilosas e jamais deverão ser arenosas. [48]

Na Tabela 6 podem ser observados dados de alguns solos com permeabilidade característica.

Tabela 6: Valores encontrados de permeabilidade de alguns tipos de solos. [48]

Tipo de solo	Permeabilidade k (m/s)
Pedregulhos	$> 10^{-3}$
Areias	10^{-3} a 10^{-5}
Baixa Siltes e argilas	10^{-5} a 10^{-7}
Muito baixa (Argila)	10^{-7} a 10^{-9}
Baixíssima (Argila)	$< 10^{-9}$

Ainda em relação às suas características, as camadas de cobertura devem apresentar além da baixa permeabilidade, estanqueidade, durabilidade, resistência

mecânica, resistência a interpéries e compatibilidade com os resíduos a serem dispostos sobre ela. [43]

É devido à baixa permeabilidade que estes sistemas evitam os mecanismos de transporte de contaminantes como advecção, dispersão e difusão. A permeabilidade tem um papel fundamental no processo, pois quanto mais veloz o fluxo, menor a possibilidade de retenção de materiais no solo.[48]

Uma pesquisa desenvolvida avaliou as características ideais de um solo para utilização como camada de cobertura de aterros demonstrando as seguintes:

- ✓ distribuição granulométrica composta de 72% de areia, 10% silte e 8% de argila;
- ✓ teor de umidade 12,98%;
- ✓ massa específica 2,72 g/cm³;
- ✓ limite de liquidez 26%, limite de plasticidade 17% e índice de plasticidade 9%.[41]

Outro parâmetro importante para o projeto de aterro é a compressibilidade e o recalque. A compressibilidade é definida como uma propriedade dos solos em mudar de forma ou de volume quando submetido a forças externas. Nos solos finos a compressibilidade é mais elevada do que nos solos grossos pois a estrutura granular é mais ampla e complexa, e os grãos, escamosos ou alongados, sofrem deformações por flexão ou dobramento. [51]

Em relação ao recalque existem dois tipos. O primeiro é por adensamento imediato, onde o índice de vazios se altera e ocorre uma variação de volume, o segundo que ocorre sem a variação dos índices de vazios, isto é, volume constante, sendo típico das areias e de carregamentos rápidos das camadas de argila. [51]

Os aterros em sua maioria são construídos sobre solos finos insaturados que quando submetidas a pressões, as camadas do subsolo ficariam sujeitas a um recalque devido a existência de ar e água nos poros. Por isso faz-se necessário conhecer uma propriedade que é característica de cada solo, chamado de coeficiente de adensamento (cv) pois este representa as condições de carregamento. Recalques observados em alguns aterros apresentaram valores na ordem de 0,1 a 0,5 m²/dia, ou seja valores em torno de 1 a 5 x 10⁻² cm²/s. [47][50]

A forma de armazenamento de água no solo é outra característica que deve ser analisada. O conteúdo de água no solo é função do tamanho e do volume dos poros que a contém, assim a umidade está diretamente relacionada com a pressão capilar. Uma forma de medir esta propriedade é através da determinação da curva de retenção ou

curva característica da água no solo. O conteúdo de água correspondente a uma dada pressão é maior na dessorção (drenagem) do que na sorção (umedecimento). [51]

Em um solo arenoso, onde predominam poros grandes, ocorre um decréscimo de umidade devido ao incremento da pressão. Em solos argilosos as curvas de retenção mostram uma diminuição gradual da umidade, devido a presença de um grande número de poros com pequenas dimensões. A Figura 11 apresenta um exemplo de curva de retenção em relação ao tipo de solo (arenosos e argilosos).

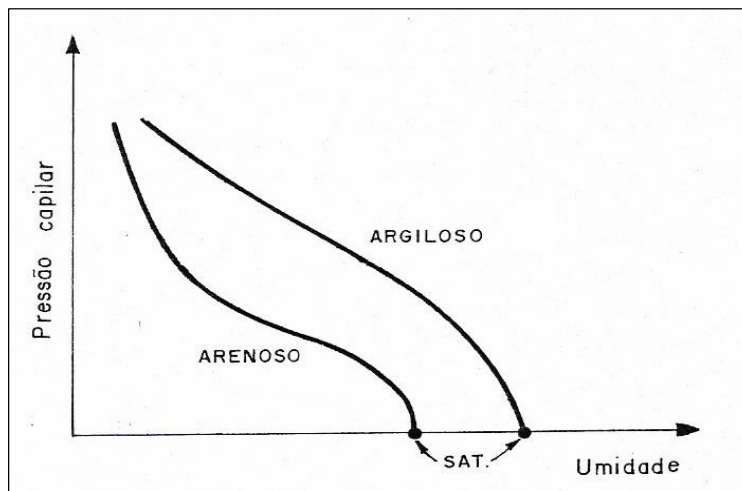


Figura 11: Curva de retenção para solos arenoso e argiloso. [51]

Outro parâmetro importante para avaliação do comportamento de camadas de aterros é a resistência. Estas camadas podem sofrer solicitações devido à acomodação e peso próprio dos resíduos, cargas pontuais e eventuais mudanças de temperatura. Isso pode ocasionar a presença de interfaces apresentando baixa resistência ao cisalhamento e acarretando o aparecimento de uma potencial superfície de deslizamento ou ruptura. Por isso, o ensaio de resistência ao cisalhamento faz-se importante. [16]

2.6.2 Geração de gases e percolado

Um aterro de resíduos sólidos é reator bioquímico, com entradas de resíduos e água e saídas de percolado e gases. O controle destas saídas é necessário principalmente ao aterro.[44]

Tanto os gases gerados como o percolado mudam de composição conforme a fase em que o aterro se encontra. Basicamente o aterro passa por 5 fases de decomposição da matéria orgânica. [44]

Fase 1 –fase inicial - a decomposição ocorre por condições aeróbicas pois há uma certa quantidade de ar no interior do aterro. A principal fonte para o desenvolvimento dos organismos aeróbios e anaeróbicos responsável pela degradação do resíduo é o material usado como cobertura diária e final. A reciclagem do percolado também é uma fonte de alimento para os organismos.

Fase 2 – fase de transição - o oxigênio diminui dando condições para os organismos anaeróbios se desenvolverem.

Fase 3 – fase ácida – a atividade microbiológica iniciada na fase 2 acelera com a produção de grandes quantidades de ácidos orgânicos.

Fase 4 – fase de fermentação do Metano – um segundo grupo de microorganismos conhecidos como metanogênicos transforma o ácido acético e gás hidrogênio formando metano e dióxido de carbono.

Fase 5 – fase de maturação – ocorre após a degradação do material orgânico. Nesta fase a taxa de formação de gases diminui pois a maioria dos nutrientes foi removida através do percolado nas fases anteriores.[44]

A relação da quantidade de percolado com a cobertura depende da permeabilidade do material utilizado. As fontes de geração de percolado são a própria decomposição dos resíduos, a água que infiltra no aterro e a umidade do resíduo. A composição do percolado vai depender da idade do aterro. A decomposição da massa de resíduos gera um percolado que apresenta diversos componentes, principalmente orgânicos. A Tabela 7 apresenta dados de características do percolado de acordo com o tempo do aterro.

Tabela 7: Compostos e valores típicos encontrados nos percolados de aterro[44]

Parâmetros	Valor típico (com menos de 2 anos) mg/L	Faixa (com mais de 10 anos) mg/L
DBO ₅	10.000	100-200
Carbono orgânico total (TOC)	6.000	80-160
DQO	18.000	100-500
Sólidos suspensos totais	500	100-400
Nitrogênio orgânico	200	20-40
Amônia	200	20-40
Nitrato	25	5-10
Fósforo total	30	5-10
Alcalinidade com CaCO ₃	3.000	200-1.000
pH	6	6,6-7,5
Cálcio	1.000	100-400
Magnésio	250	50-200
Potássio	300	50-400
Sódio	500	100-200
Cloreto	500	100-400
Sulfato	300	20-50

A concentração de metais como Fe, Mn, Zn, Mg, Cu, Pb e Cd é elevada em aterros jovens devido ao ambiente ácido que permite a solubilização dos íons metálicos. Estas concentrações tendem a diminuir com o tempo, à medida que o pH aumenta. A Tabela 8 apresenta alguns valores de metais em mg/L presentes no efluente. [52]

Tabela 8: Metais presentes no efluente [52]

Parâmetro	Aterro jovem	Aterro médio	Aterro antigo
Cromo	0,14	0,56	0,04
Manganês	22,8	26,5	2,15
Ferro	102	540	22,5
Níquel	0,18	0,57	0,09
Cobre	0,08	0,12	0,03
Zinco	17,6	21,5	0,37
Cádmio	<0,005	0,031	0,008
Chumbo	0,11	0,40	0,14

O controle do movimento de percolado é realizado através das camadas de coberturas. Por isso se utilizam as argilas que possuem a habilidade de absorver e reter muitos constituintes químicos encontrados no percolado. Entretanto faz-se necessário o uso da combinação de geomembranas com solos argilosos especialmente devido à maior resistência da geomembrana no controle de gases e movimentação de percolados.[44][45]

Na Tabela 9 podem ser visualizados os materiais utilizados como camadas de cobertura ou intermediárias visando controle de gás e movimento de percolado.

Tabela 9: Materiais utilizados como selantes para controle de gás e movimentação de percolado. [44]

Classificação	Tipos	Observação
Solo compactado ou argila compactada	Bentonitas, Ilitas e Kaolitas	São os mais utilizados.
Elementos químicos inorgânicos	Carbonato de sódio, Silicatos ou Pirofosfato	Usado dependendo do solo local característico
Elementos químicos sintéticos	Polímeros, Borrachas	Somente em escala experimental devido a estabilização dos materiais
Membranas sintéticas	Polietileno, Cloreto de polivinil, borrachas, nylon.	Utilização comum para controle do percolado e controle dos gases
Asfaltos	Asfaltos modificados, borrachas integradas em asfalto, concreto.	Algumas camadas podem requerer espessuras para manter a condutividade baixa.

A fonte de geração de gases é a decomposição da fração orgânica dos resíduos. Pode-se citar os principais componentes presentes: Metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂), Nitrogênio (N₂), Oxigênio (O₂), Monóxido de Carbono (CO), Sulfitos, Mercaptanas etc. [44]

Em condições normais, os gases são lançados na atmosfera através do mecanismo de difusão. No caso dos aterros, a pressão interna é maior que a pressão atmosférica devido ao confinamento, então os gases são movimentados por convecção e por difusão. Para conter o movimento dos gases faz-se necessária a construção de coletores. Assim as barreiras impermeabilizantes têm também a função de não permitir que gases não coletados escapem para a atmosfera. Cabe ressaltar que os principais gases passam por difusão nos materiais argilosos portanto algumas agências ambientais exigem o uso de geomembrana para limitar o movimento de gases e percolados no aterro. [44] [45]

Devido às características das ADF, não é esperada uma mudança na geração de gases e percolados nos aterros utilizando este material como camada de cobertura.

2.6.3 Uso de resíduos em camadas de cobertura de aterros

As camadas de materiais alternativos diferenciam dos modelos convencionais por apresentarem novas opções de materiais, espessuras ou número de camadas. O surgimento de materiais alternativos tem crescido devido ao incentivo à reciclagem, à redução de impacto que o ambiente pode sofrer com o consumo de matéria-prima e a geração desordenada de resíduos. Para isso, é necessário um bom conhecimento do material a ser utilizado como suas propriedades e a viabilidade econômica da sua produção e utilização.[43]

Alguns resíduos já foram pesquisados para utilização como camadas de cobertura citando principalmente os resíduos de papel e resíduos da construção civil. A utilização de resíduos provenientes da indústria para uso como camadas alternativas deve levar em consideração a eventual variabilidade destes resíduos na fonte geradora. [43]

A viabilidade da utilização de resíduos para as camadas de cobertura, intermediária ou definitiva de aterros de resíduos depende da disponibilidade, caracterização e da análise das particularidades de comportamento destes materiais e o impacto ambiental decorrente de sua utilização.[53]

O resíduo de lodo da estação de tratamento apresenta um índice alto em matéria orgânica, um alto teor de umidade e é altamente compressível. Desde os anos 70 se estuda este resíduo para utilização nas camadas de cobertura, mas somente nos anos 90 é que foi instalado na prática o resíduo como cobertura de aterro. [43]

Já para a aplicação dos resíduos de papel foi necessário instalar uma camada drenante acima e abaixo da camada impermeabilizante de papel para promover o adensamento. Cabe ressaltar que este resíduo possui potencial de degradação o que pode comprometer a camada impermeabilizante. A Figura 12 apresenta a configuração das camadas de cobertura utilizando o resíduo de papel.[53]

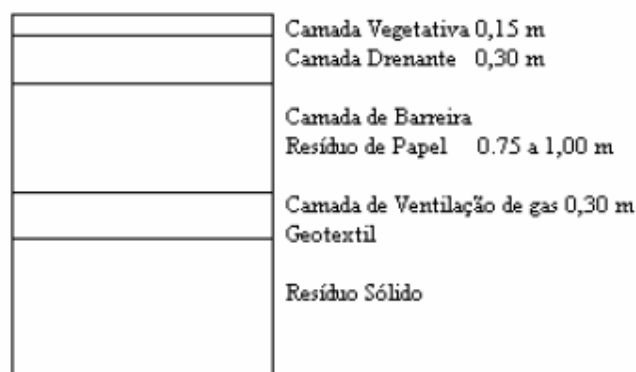


Figura 12: Configuração de um aterro utilizando resíduo de papel.[53]

Lodos de Estação de Tratamento de Água e Esgotos também já foram pesquisados como materiais alternativos de cobertura de aterro, pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Nesta pesquisa três etapas foram seguidas: a primeira que constituiu em caracterizar os resíduos, a segunda permitiu que os resíduos fossem estabilizados com um álcali e a terceira que constituiu em adequar geotécnicamente as misturas com um solo argiloso. A etapa de estabilização alcalina fez-se necessária para destruir microrganismos patogênicos, diminuição do odor e fixação de metais pesados. [33]

Os seguintes ensaios geotécnicos foram realizados:

1. Análise granulométrica;
2. Limite de Liquidez;
3. Limite de plasticidade;
4. Massa específica dos grãos;
5. Compactação
6. Permeabilidade.

Foi verificado que para a utilização geotécnica dos resíduos fazia-se necessário realizar mais ensaios como adensamento, cisalhamento e resistência à erosão. [33]

Outro resíduo estudado como alternativa em coberturas intermediárias foi a espuma long-lasting Aft-500, que pode ser aplicada com pulverizadores. Este material faz a cobertura durar até 40 dias após a sua aplicação em um aterro de resíduos sólidos urbanos.[33]

Encontraram-se também estudos utilizando cimento e cinzas de carvão (de fundo e volante) misturadas a bentonita para a construção de barreiras. A mistura de materiais a uma argila pode trazer melhoras nas propriedades, tais como, diminuição da tendência de contração das argilas ou siltes puros, diminuir os índices de vazios, homogeneizando a granulometria e facilitando em muitos casos a construção.[22]

Um estudo mostrou que a mistura de cinzas de fundo e volantes junto à bentonita não reduziu a permeabilidade, podendo com isso ser viabilizado este material para utilização em barreiras permeabilizantes. [22]

Todas estas pesquisas mostram que a reutilização de resíduos é viável pois alguns destes materiais apresentam propriedades geotécnicas interessantes para uso como cobertura de aterros de resíduos.

2.7 Aspectos legais acerca do assunto

Em Agosto de 2007 o Estado de São Paulo através da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) determinou diretrizes para a reutilização da areia descartada de Fundação na produção de concreto asfáltico e artefatos de cimento ou de concreto, observando critérios específicos estabelecidos. O órgão ambiental considerou as seguintes diretrizes:

- ✓ o objetivo da Lei Estadual de Resíduos Sólidos onde prevê a minimização dos resíduos por meio de incentivos às práticas ambientalmente adequadas de reutilização, reciclagem, redução e recuperação e o reconhecimento do resíduo reutilizável e reciclável como um bem econômico, gerador de trabalho e renda.
- ✓ a reutilização criteriosa do resíduo areia de fundição pode contribuir para o aumento da vida útil dos aterros.
- ✓ de acordo com referências bibliográficas internacionais, o resíduo industrial areia de fundição tem apresentado viabilidade ambiental para a sua reutilização na produção de concreto asfáltico e artefatos de cimento ou de concreto, desde que observados critérios específicos estabelecidos.
- ✓ a crescente demanda de empresas solicitando manifestação da CETESB sobre a possibilidade da reutilização do resíduo areia de fundição.
- ✓ a necessidade de se estabelecer critérios para a reutilização do resíduo industrial areia de fundição, na produção de concreto asfáltico e artefatos de cimento ou de concreto, evitando-se, desta forma, a sua reutilização de forma inadequada.[54]

Diante da iniciativa da CETESB a Associação Brasileiro das Indústrias de Fundação (ABIFA) pela sua comissão de meio ambiente buscou-se junto a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a necessidade de criação de normas sobre aplicação da ADF no Brasil.

Assim criou-se, em Fevereiro de 2008, uma comissão de estudos chamada CB-59 que viabilizou a criação da ABNT NBR 15.702 – Areia descartada de fundição: aplicação em asfalto e em aterro sanitário. [31]

A criação desta norma específica sobre a ADF é inédita no Brasil, pois dentre todas as Normas ABNT sobre resíduos nenhuma delas incentiva ou fornece diretrizes a respeito da aplicação de resíduos que é o ponto primordial nas legislações estaduais sobre resíduos sólidos.

Já em Agosto de 2008 criou-se no Estado de Santa Catarina a CONSEMA 11/2008 que 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. [55]

Tanto esta Resolução quanto a Norma ABNT estabelecem alguns requisitos para o uso da ADF, dentre eles destacam-se aquelas voltadas às obrigações das empresas de Fundição:

- ✓ obter dados caracterização do processo industrial, contendo indicação do processo de moldagem, matérias-primas principais (material a ser fundido e tipo de aglomerante), fluxograma com a indicação das operações unitárias e da quantidade de ADF gerada;
- ✓ obter os laudos de caracterização e de classificação da ADF, segundo a norma NBR 10004;
- ✓ as análises do extrato lixiviado sofre alterações baseados na Decisão de Diretoria da CETESB, necessitando realizar um extrato do lixiviado neutro;
- ✓ realizar de forma adequada a segregação da ADF;
- ✓ para a utilização, seja ela qual forma, a ADF deve ser tratada como resíduo, ou seja, para o armazenamento temporário deve dimensionado estritamente com a função de dar o apoio logístico necessário para a posterior recuperação interna ou externa, utilização ou disposição final, seguindo os critérios da NBR 11174 - Armazenamento de Resíduos Classe II - Não Inertes e III – Inertes;
- ✓ para o uso em artefatos de concreto e cerâmico faz-se necessário realizar testes de toxicidade;
- ✓ tanto a indústria de Fundição como a usuária da Areia devem possuir Licença Ambiental para a atividade a ser desenvolvida.

A criação destas normas cria diretrizes tanto para a indústria de fundição como para os órgãos ambientais, trazendo benefícios já citados na aplicação de um resíduo

como sub-produto. Porém vale ressaltar que em se tratando de resíduos cada indústria deve avaliar as características dos mesmos pois geralmente são diferenciados devido ao processo produtivo.

Cabe ressaltar que no estado do Rio Grande do Sul existe a resolução CONSEMA nº 073/2004 que inviabiliza a utilização de resíduos industriais misturados com resíduos domésticos. [56]

Assim, se viabilizado a utilização da ADF para cobertura de aterros será necessário rever esta Resolução, pois neste caso o resíduo está sendo tratado como um sub-produto.

3 MÉTODOS E TÉCNICAS

Este capítulo apresenta os métodos e técnicas utilizadas para caracterizar geotécnicamente e ambientalmente duas amostras de ADF.

Os ensaios geotécnicos foram conduzidos com amostras coletadas a partir de resíduos gerados em duas etapas do processo produtivo da empresa de fundição Voges Metalurgia Ltda. Apesar de ambas amostras serem de areia de fundição do tipo verde elas apresentam características bem diferenciadas em função dos processos pelos quais passam na linha de produção.

A Figura 13 apresenta os aspectos da ADF do tipo verde. Os dois tipos de resíduos são gerados após o processo de desmoldagem em que o material passa por um processo de separação: pó de areia (PAV), torrão e areia verde (AV). Parte da areia retorna ao processo e o que for excedente é descartado.

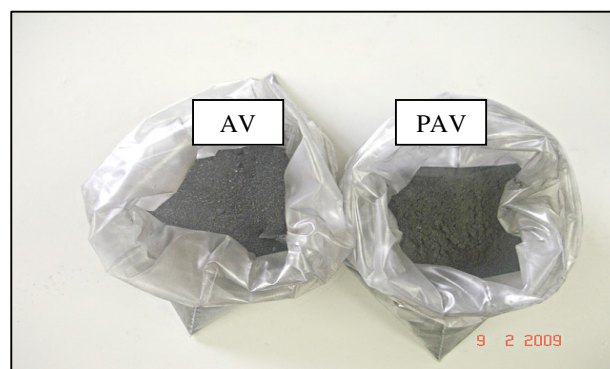


Figura 13: Aspectos das amostras estudadas.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos na Universidade de São Paulo e no Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade de Caxias do Sul.

Para atingir o objetivo proposto, depois de identificado o problema, as etapas de trabalho constituíram em determinar as propriedades físicas e ambientais do material e avaliar os impactos da utilização proposta.

3.1 Caracterização geotécnica

Esta etapa permitiu comparar as características da ADF com os requisitos dos materiais usualmente empregados em camadas de coberturas de aterros. Para isso foi necessário realizar a caracterização inicial do material e da aplicabilidade do mesmo.

Os ensaios realizados foram: índices físicos, limites de Atterberg (limite de plasticidade e limite de liquidez), teor de bentonita, análise granulométrica, compactação, permeabilidade, absorção, retenção, adensamento, resistência ao cisalhamento, ensaios de trincas. e lixiviação.

3.1.1 Coleta e preparação das amostras

As amostras foram coletadas na saída do processo produtivo sem passar inicialmente por nenhum processo de preparação e foram acondicionadas em sacos plásticos até o transporte para o laboratório conforme a norma ABNT NBR 6457.[57]

As amostras foram coletadas em duas etapas, a primeira na data 15/06/2007 e numa segunda etapa em 10/05/2008.

3.1.2 Índices Físicos

Os índices físicos identificam as três fases componentes do solo (sólidos, água e ar) e são parâmetros determinantes em projetos de engenharia. Os índices analisados neste trabalho foram: densidade dos sólidos ou massa específica dos grãos, umidade, densidade do solo, índices de vazios e porosidade. Destes somente os dois primeiros foram determinados em laboratório e o restante foi calculado a partir dos resultados determinados.[50]

3.1.2.1 Densidade dos sólidos ou massa específica (γ_s)

A densidade dos sólidos ou massa específica (γ_s) é a relação entre a quantidade de matéria e o volume. Este é um parâmetro importante para avaliar as quantidades necessárias e o volume ocupado em um projeto. A massa específica foi determinada pelo método do balão volumétrico, da seguinte forma: [58]

- ✓ Recolheu-se uma quantidade não determinada da amostra e adicionou-se água, deixando em repouso um dia;
- ✓ No dia seguinte agitou-se no misturador por 15 minutos;
- ✓ Transferido para balão volumétrico de 1 Litro;
- ✓ Completado o volume com água;
- ✓ Agitou-se a amostra no balão volumétrico para remover todas as bolhas de ar entre os grãos;
- ✓ Removeu-se o excedente deixando em repouso por mais um dia;
- ✓ Após todas estas etapas mediu-se o peso da amostra.

3.1.2.2 Teor de umidade (w)

A quantidade de água presente na ADF é de extrema importância, pois define como o material irá se comportar em relação à estrutura e compactação. O teor de umidade foi determinado conforme a norma ABNT NBR 6457. [57]

3.1.2.3 Densidade do solo (γ_d), índices de vazios (e) e porosidade (n)

A densidade do solo corresponde ao peso específico do solo seco. Os valores encontrados normalmente situam-se na faixa de 13 a 19 kN/m³ e é calculado através da equação 1:[50]

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1 + w} \quad (1)$$

Onde:

γ_n : peso específico natural

W : umidade.

O índice de vazios corresponde ao volume de vazios e o volume das partículas sólidas, encontra-se na faixa de 0,5 e 1,5 e pode ser calculado pela equação 2. [50]

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (2)$$

Onde:

γ_s : densidade dos sólidos.

γ_d : densidade do solo.

A porosidade consiste na relação entre o volume de vazios e o volume total. Valores encontram-se geralmente entre 30 a 70%. Pode ser calculado pela equação 3. [50]

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (3)$$

Onde:

e: índice de vazios.

3.1.3 Limites de Atterberg (Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez)

Os limites de Atterberg indicam o comportamento do material a partir de sua fração fina, em especial as argilas, com base no teor de umidade e fornecem a medida de plasticidade do material. A plasticidade é importante para determinação da trabalhabilidade do material o que influencia no seu fissuramento como função de teor de água presente. Foram seguidas as normas ABNT NBR 6459 e ABNT NBR 7180. [60][61]

3.1.4 Teor de bentonita

Ensaio realizado de acordo com a Norma ASTM C 837-81. Os testes foram realizados no Laboratório de Qualidade da empresa Voges Metalurgia Ltda onde estes testes são realizados diariamente pois as quantidades de bentonita interferem na construção do molde. [62]

3.1.5 Análise granulométria

Ensaio realizado através de peneiramento e sedimentação através da Norma ABNT NBR 7181. [63]

3.1.6 Compactação

O método utilizado foi realizado com base no ensaio de *Proctor* Normal que determina a densidade seca máxima e a umidade ótima. Os procedimentos da Norma ABNT NBR 7182 também foram utilizados. [64]

3.1.7 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado com o permeâmetro de parede flexível Triflex 2. A norma que rege este ensaio é a Norma ASTM D5084-90. [65]

Após a compactação, o corpo de prova foi moldado entre duas pedras porosas envolvido por uma membrana flexível, na qual ocorre a separação da pressão externa com a pressão neutra da amostra. Após a preparação no equipamento, começou o aumento da pressão confinante e uma pressão no corpo de prova, ocorrendo assim a saturação deste. As pressões confinantes utilizadas de 50 e 200 KPa.

3.1.8 Absorção

Para este ensaio fez-se necessário analisar a umidade das amostras em três ambientes: com sílica, água e ar. A sílica é um material que tem propriedade de alterar os valores de umidade pois tende a absorver-la. Já a exposição das amostras a um ambiente com água tem como objetivo verificar seu comportamento num ambiente muito úmido e por fim ao ar para apresentar o comportamento normal das amostras. O sistema montado para análise da absorção foi monitorado por 18 dias. Para este ensaio foram realizadas as seguintes etapas:

- ✓ Um dessecador foi preenchido com sílica, e outro com água ;
- ✓ Quatro frascos de volumes conhecidos foram preenchidos com as amostras;
- ✓ Os frascos foram divididos e inseridos nos dessecadores;
- ✓ Deixou-se em repouso;
- ✓ Outras duas amostras foram deixadas ao ar;
- ✓ Durante 18 dias as amostras foram pesadas diariamente;
- ✓ Por fim as amostras foram colocadas em uma estufa para obtenção da umidade final.

3.1.9 Retenção

A curva de retenção foi determinada em laboratório através de três etapas: placa de sucção, placa de pressão e por último o método do papel filtro.[66]

A amostra na umidade ótima é mantida num umedecimento gradual. A aplicação de uma sucção provoca a drenagem nos vazios do solo e gera uma pressão negativa nos mesmos. O método tem como princípio a teoria dos vasos comunicantes.[53]

A Figura 14 apresenta um esquema da placa de sucção que consiste na diferença de altura da metade do corpo de prova até o reservatório.

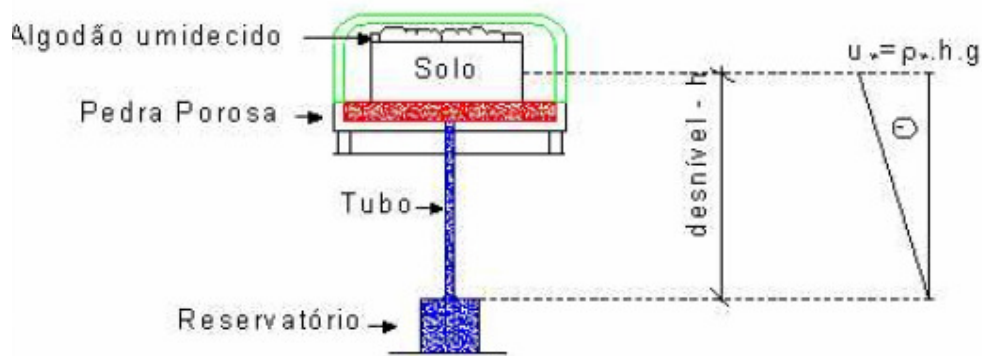


Figura 14: Esquema da placa de sucção. [53]

A curva de retenção foi calculada com base na umidade gravimétrica, grau de saturação e umidade volumétrica.

3.1.10 Adensamento

Consistem em processos de deformação lentos devido ao tempo necessário para que a água saia dos vazios do solo. Assim este ensaio de compressão é conhecido como ensaio de adensamento. Este é largamente utilizado na determinação de recalques em solos argilosos.[50]

Os parâmetros de deformabilidade da amostra, expressos pelo coeficiente de adensamento (c_v) foram calculados pelo método de Taylor, seguindo a equação 4.

$$c_v = \frac{0,848 \times H_d}{t_{90}} \quad (4)$$

Onde:

H_d : altura do corpo de prova (cm);

t_{90} : tempo em 90 minutos.

O ensaio foi realizado em estágios de pressão aplicada nos corpos de prova, saturados e confinados lateralmente. Depois de aplicada a tensão foi realizada aferição da redução de sua altura.

3.1.11 Resistência ao Cisalhamento

A resistência de uma argila depende do índice de vazios em que ela se encontra, proveniente das tensões atuais e passadas, da estrutura da argila. A resistência ao cisalhamento é associada a um ângulo de atrito interno e uma coesão, definidos a partir da envoltória de resistência Mohr-Coulomb, assim apresenta a relação tensão-deformação típica da amostra. [50]

O ensaio realizado foi o ensaio de resistência ao cisalhamento direto através da qual aplica-se uma tensão normal num plano e verifica-se a tensão cisalhante provoca na ruptura. Em função das amostras apresentarem uma grande quantidade de argila, o ensaio foi realizado com as amostras drenadas.[50]

O corpo de prova é inserido parcialmente numa caixa de cisalhamento, ficando com sua metade superior dentro de um anel, assim realiza-se o ensaio aplicando as tensões de 20, 50 e 100 KPa .

O intervalo das leituras foi em: 0, 7,5, 15 e 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas.

O cálculo do ângulo de atrito seguiu o círculo de Mohr para ambas as amostras.

3.1.12 Ensaio de contração

Para a realização dos ensaios de contração foram confeccionadas duas caixas com as seguintes dimensões 40 x 40 x 5 cm e 40 x 10 x 5 cm. O ensaio foi monitorado durante 30 dias num local coberto. Abaixo seguem informações do procedimento adotado.

- ✓ As caixas de madeira foram preparadas com divisões verticais de forma a se ter três camadas de 1,67 centímetros;
- ✓ Foram fixados grampos nas caixas para divisão da mesma em quadrados de igual tamanho, afim de facilitar o monitoramento das trincas;

- ✓ Iniciou-se a adição do material, pesado previamente, nas caixas afim de preencher sucessivamente as três camadas ;
- ✓ Foi realizado a compactação na umidade ótima do material de cada camada ;
- ✓ Houve a necessidade da escarificação da camada compactada, afim de garantir a união com a camada seguinte;
- ✓ Adicionou-se o material e compactou-se as duas camadas seguintes;
- ✓ Foram presas fitas aos grampos para a separação em quadrados de igual tamanho;
- ✓ A última camada foi subdividida em outras três camadas para que sua compactação pudesse ser realizada.

As trincas foram fotografadas ao final de 30 dias de forma a permitir sua identificação e medição. As fotografias foram analisadas com o auxílio do programa autocad. Também foi monitorada a evaporação por 30 dias em um local coberto.

3.1.13 Lixiviação

O ensaio de lixiviação do material foi desenvolvido conforme a ABNT NBR 10.005 e a norma ABNT NBR 15.702 – Areia descartada de fundição: aplicação em asfalto e em aterros sanitários que solicita o ensaio para obtenção de extrato aquoso.[31]

Os resultados foram comparados com os limites estabelecidos pelas duas normas.

3.2 Avaliação dos impactos ambientais.

Esta etapa objetivou identificar os impactos ambientais positivos e negativos da utilização das ADF em substituição ao material usualmente empregado em camadas de cobertura. O método utilizado foi a rede de interação que possibilitou a seleção dos impactos mais críticos para serem detalhados.[67]

Os impactos selecionados foram então avaliados por técnicas de avaliação de impactos ambientais (AIA).

A técnica utilizada para identificação de impactos foi à rede de interação. As redes de interação são utilizadas para identificar os impactos indiretos (secundários, terciários) e suas interações através de gráficos ou diagramas. Assim esta metodologia auxilia a promover uma abordagem integrada à análise dos impactos ambientais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este item apresenta os resultados da caracterização geotécnica das amostras AV e PAV, também são apresentados os resultados da avaliação ambiental para aplicação das amostras como substituta da matéria-prima usualmente utilizada para camadas de cobertura de aterros.

4.1 Índices físicos e limites de Atterberg

Os resultados dos índices e limites são apresentados na Tabela 10. Todos os índices foram calculados na umidade ótima definida no ensaio de compactação.

Tabela 10: Índices físicos

Parâmetro	Amostras	
	AV	PAV
Densidade dos sólidos (g/cm^3)	2,557	2,021
Densidade do solo (g/cm^3)	2,011	1,489
Índices de vazios	0,425	0,760
Porosidade (%)	29	43
Teor de umidade natural (%)	1,028	7,028
Limite de Liquidez (%)	20,4	72
Limite de Plasticidade (%)	Não plástica	36,4
Índice de Plasticidade (%)	Não plástica	35,5

Os valores de densidade dos sólidos encontrados para AV e PAV foram respectivamente de 2,557 e 2,021 g/cm^3 . Pelos resultados de densidade, observa-se que a amostra PAV possui valores inferiores, pois é composta de um material mais fino. Percebe-se que os valores encontrados para a amostra AV foram semelhantes aos descritos nas pesquisas com ADF (2,50-2,73 g/cm^3), já o PAV apresentou densidade de sólidos abaixo dos valores encontrados em literatura.

A densidade do solo apresentou valores de 2,011 e 1,489 g/cm^3 para a amostra AV e PAV respectivamente. Percebe-se que o valor de PAV encontra-se dentro da faixa indicada na bibliografia (1,3 a 1,9 g/cm^3). [4] [10][11][12]

O índice de vazios mostrou valores para AV de 0,425 e para PAV de 0,760 e que somente a PAV encontrou-se dentro da faixa indicada pela bibliografia que é de 0,5 a 1,5, já a AV apresentou o índice de vazios pouco abaixo desta faixa. O valor maior encontrado para a amostra PAV é devido esta possuir maior teor de finos. [50]

A porosidade apresentou os seguintes valores: 29% para amostra AV e 43% para amostra PAV. Conforme o resultado do índice de vazios a amostra AV ficou abaixo do indicado pela bibliografia que é de 30 a 70%. [42][47]

Os valores de teor de umidade mostraram valores de 1,028% para AV e 7,028% para PAV. Este resultado já era esperado, visto que o processo de vazamento de metal na areia promove aquecimento levando à evaporação da água presente. Comparando as amostras verifica-se que a PAV apresentou valores mais altos que AV e não foram semelhantes aos estudos de ADF (3-5%). [10][11][12][4]

Em relação aos limites de Atterberg os valores encontrados para o limite de liquidez foram 20,4% e 72% para AV e PAV respectivamente. O alto índice do valor da amostra PAV pode ser explicado pela presença maior de finos. Ainda pode ser observado que a amostra AV que possui poucos finos é caracterizada como não plástica e a PAV que possui um alto teor de finos apresentou valores de limite de liquidez e plasticidade altos. Os requisitos para as cobertura de aterros recomendam que o limite de liquidez se encontre na faixa de 30 a 60%, o que mostra que ambos os valores encontraram-se fora da faixa. Já em relação ao índice de plasticidade obtiveram-se valores de 20,4 e 35,5% para AV e PAV respectivamente. Assim, somente a PAV mostrou um valor acima do sugerido para uso em coberturas de aterros que fica na faixa de 11 a 30%. [42][47]

4.2 Teor de bentonita

O teor de bentonita é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Teor de bentonita

Amostra	Teor (%)
AV	6,2
PAV	25,6

O valor encontrado para a amostra AV foi de 6,2%, já para a amostra PAV o valor encontrado foi de 25,6%. A quantidade maior de bentonita no Pó de Areia Verde explica-se pelo fato da bentonita possuir uma granulometria fina, sendo assim no momento da separação do material, é no PAV onde fica a maior parte de bentonita.

Além disso, o valor encontrado nesta amostra ficou muito superior ao encontrado na bibliografia. Estudos indicaram a quantidade de bentonita em ADF na faixa de 2-13%. [4][10][11][12]

4.3 Granulometria

A Figura 16 apresenta a curva granulométrica das amostras. Conforme observa-se a maior parte da granulometria da amostra AV concentra-se entre os diâmetros de 0,1 e 0,4 mm, já a amostra PAV possui diâmetros na faixa de 0,02 a 0,1 mm.

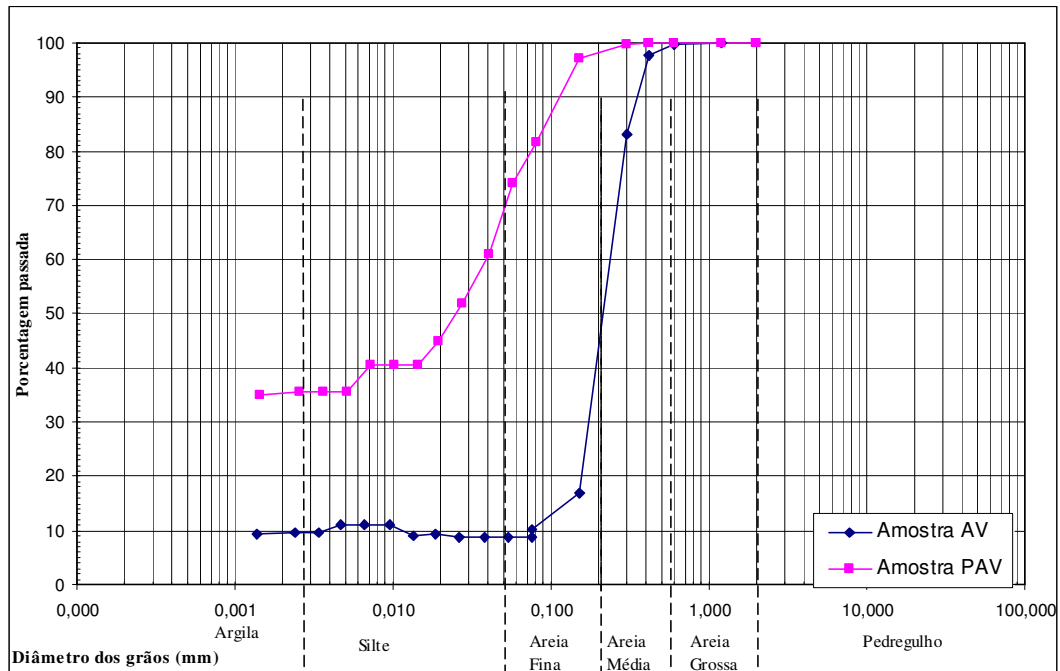


Figura 15: Distribuição Granulométrica das amostras AV e PAV

Percebe-se pelo gráfico de granulometria as seguintes percentagens:

Areia Verde:

- ✓ 10% Argila;
- ✓ 35% Areia Fina;
- ✓ 55% Areia Média.

Pó de Areia Verde:

- ✓ 36% Argila;
- ✓ 34% Silte;
- ✓ 30% Areia Fina.

Confrontando os dados dos limites de Atterberg, mostrados na carta de plasticidade, com o gráfico de granulometria, segundo o Sistema de Classificação

Unificada do Solo percebe-se que as amostras AV e PAV são SC (Areia Argila) e MH (silte com alta compressibilidade) respectivamente.

Os estudos com ADF mostraram uma classificação diferente da encontrada sendo definida como SP (areia mal graduada) e SM (solo siltoso). [10]

Porém em relação às características do solo a literatura especifica que o solo para ser usado como cobertura de aterro deve ser classificado como CL, CH, SC ou OH, sendo então, a amostra AV enquadrada como passível para esta aplicação. [42]

4.4 Compactação

As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados de compactação, que permitiu verificar a relação entre a densidade seca máxima (γ_d) e o teor de umidade ótimo (W) para a melhor compactação. De um modo geral pode-se afirmar que ambas as amostras apresentaram curvas de compactação típicas. O pico de compactação ótima é facilmente identificado nos gráficos de compactação se podem ser observados os picos nos dois ensaios, indicando a melhor umidade para a compactação.

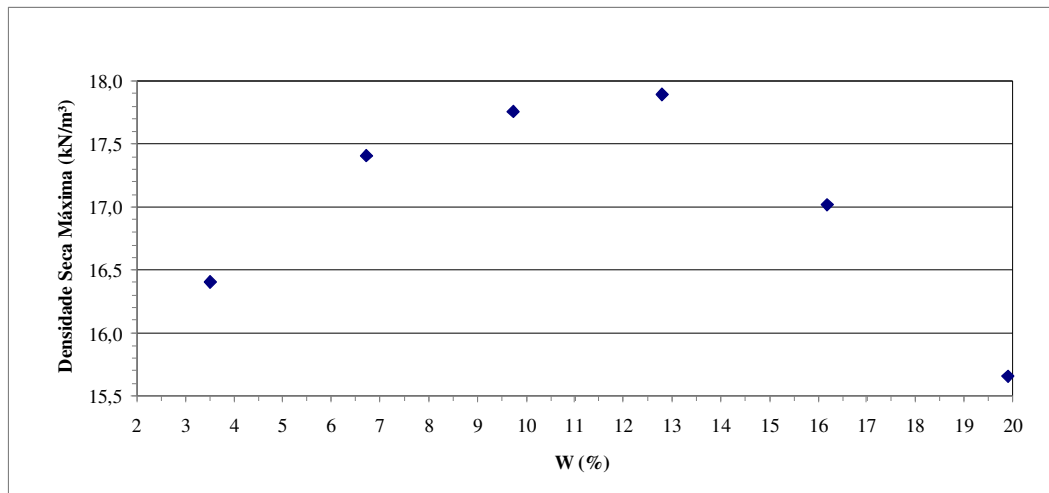


Figura 16: Curva de compactação da amostra AV.

Percebe-se na amostra AV uma densidade seca máxima no valor de $1,794 \text{ g/cm}^3$ numa umidade ótima (Wot) de 12,10%. Este valor foi muito semelhante ao valor encontrado na literatura, de 110 pcf o que corresponde a $1,762 \text{ g/cm}^3$. [10]

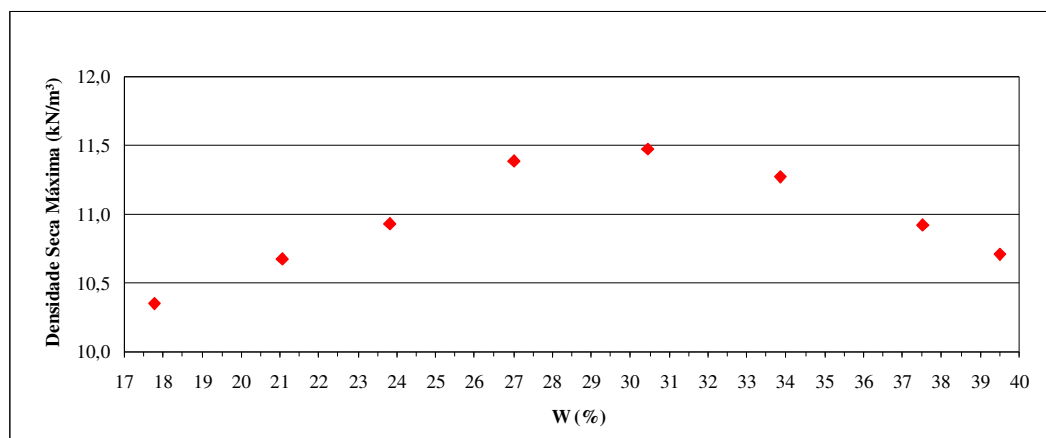


Figura 17: Curva de compactação da amostra PAV.

Já a amostra PAV apresentou um valor de densidade seca máxima de $1,148 \text{ g/cm}^3$ numa umidade ótima (Wot) de $29,7\%$. Este valor ficou muito diferente do encontrado na literatura e da amostra AV, pois a amostra PAV apresenta maior quantidade de finos e um maior índice de vazios. [10]

4.5 Permeabilidade

Os valores de permeabilidade das amostras são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados de permeabilidade

Parâmetro	Amostras	
	AV	PAV
Permeabilidade (m/s)	1×10^{-10}	3×10^{-12}

O valor limite aceitável em termos de permeabilidade para um solo poder ser usado em coberturas de aterros é igual ou menor que 10^{-9} m/s , porém a NBR 13896 cita que este coeficiente deve ser inferior a 10^{-6} cm/s . Este parâmetro é um dos mais importantes para o material a ser utilizado em camadas de coberturas de aterros porque representa a capacidade de transporte de fluidos através do material. A amostra PAV apresentou um valor menor de coeficiente de permeabilidade pois este parâmetro é diretamente proporcional ao teor de bentonita. Este baixo valor de permeabilidade deve-se ao fato de a AV apresentar 90% de sua constituição granulométrica na faixa das areias fina e média. Já o PAV apresenta 70% de material na faixa de siltes e argilas. [39]

Na literatura os valores para amostras de ADF foram $1,8 \times 10^{-8}$ m/s e $9,5 \times 10^{-9}$ m/s. [10][11][12] [4]

4.6 Absorção

A Figura 18 apresenta os resultados de absorção.

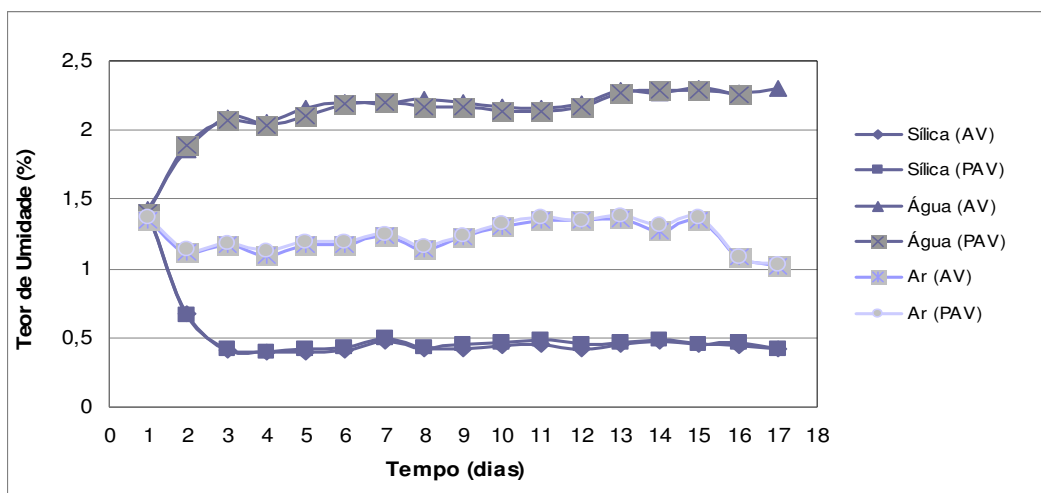


Figura 18: Resultado de absorção

As amostras quando deixadas ao ar iniciaram com uma umidade de 1,36% e ao final do monitoramento apresentaram umidade de 1,03%, correspondendo a uma perda natural de umidade de 24,26%.

Quando expostas ao ambiente com sílica, as amostras apresentaram uma umidade inicial de 1,40% e ao final do ensaio apresentaram valor de 0,41% apresentando uma perda de 70,72% da umidade inicial.

Em relação ao ambiente com umidade extrema (água) as amostras iniciaram com umidade de 1,40% e ao final apresentaram valor de 2,27% correspondendo a um ganho de 62,14%.

Estes resultados permitem concluir que ambas as amostras quando submetidas a ambientes muito secos ou muito úmidos apresentam grande capacidade tanto de absorver quando de perder água para o meio. Não se percebeu diferença na capacidade de absorção entre as amostras.

4.7 Retenção

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam as curvas de retenção para as amostras propostas em função dos índices de umidade: umidade gravimétrica, grau de saturação e umidade volumétrica.

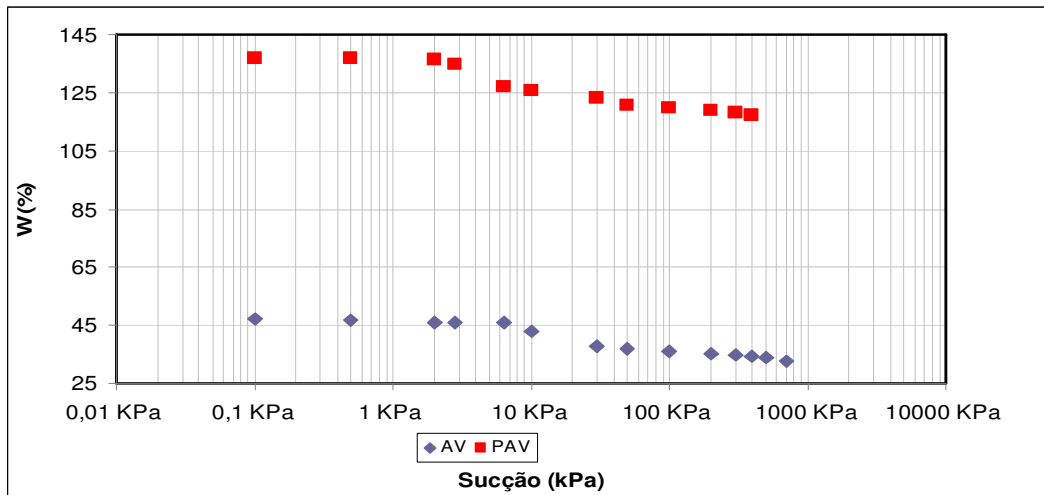


Figura 19: Curva de retenção em função da umidade gravimétrica.

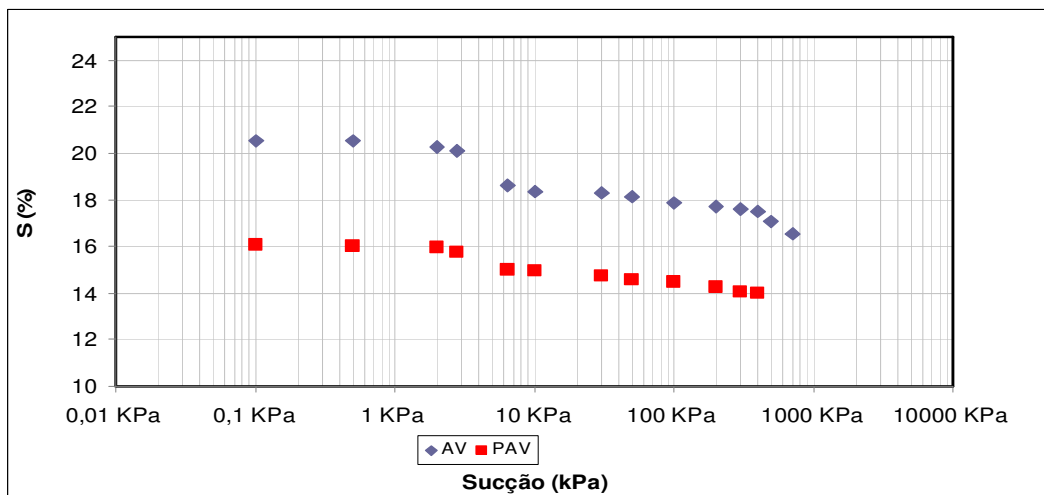


Figura 20: Curva de retenção em função do grau de saturação.

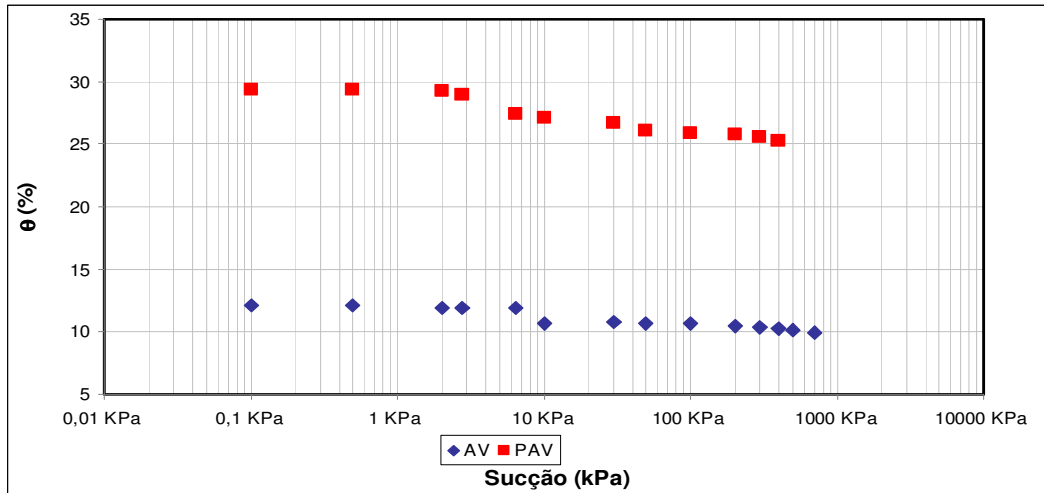


Figura 21: Curva de retenção em função da umidade volumétrica.

O ensaio desenvolveu-se na placa de pressão até a sucção de 50KPa e após seguiu-se o ensaio até 700 KPa na panela de pressão.

Pela Figura 20 pode ser analisado que a amostra PAV possui maior capacidade de reter umidade do que a amostra AV, pois os valores de umidade gravimétrica da amostra PAV variaram de 136,8 a 117,19% já os valores da amostra AV variaram em 47,4 a 32,6%.

Em relação à saturação percebe-se pela Figura 21 que a faixa de valores da amostra PAV foi de 16,07 a 13,9% e a faixa de valores da amostra AV foi de 20,5 a 16,5. Percebe-se também que ocorre uma grande dessaturação nas pressões de 2,8 e 6,457 KPa para ambas as amostras sendo que os valores de saturação foram 18,59% para a amostra AV e 14,9% para a amostra PAV. Ainda cabe ressaltar que a saturação residual das amostras foram 16,54% e 13,97% para AV e PAV, respectivamente.

Nota-se que a amostra PAV possui valores menores de saturação tanto na dessaturação como na saturação residual que a amostra AV, isso pode ser explicado pelo fato de que estas propriedades estão relacionadas diretamente com a granulometria das amostras.

E por fim pela Figura 22 pode ser analisado pelos valores da amostra PAV que foram de 29 a 25,2% enquanto que os valores da amostra AV chegaram em 12,07 a 9,94% que a amostra PAV tem maior capacidade de reter água.

Cabe ressaltar que a amostra PAV possui maior teor de argila o que explica este comportamento.

Em relação à bibliografia os gráficos assemelharam-se aos encontrados para solos argilosos. [51]

4.8 Adensamento

A Tabela 13 apresenta os dados do corpo de prova para este ensaio.

Tabela 13: Dados dos corpos de prova das amostras.

Parâmetros	Valores	
	AV	PAV
Teor de umidade (%)	7,4 (antes do ensaio) 15 (depois do ensaio)	30 (antes do ensaio) 32 (depois do ensaio)
Densidade do solo seco (g/cm^3)	1,723	1,078
Índices de vazios	0,484	0,87
Grau de saturação (%)	39	11,4

A Figura 22 apresenta o gráfico de adensamento das amostras AV e PAV, indicando a variação do índice de vazios com a tensão efetiva aplicada.

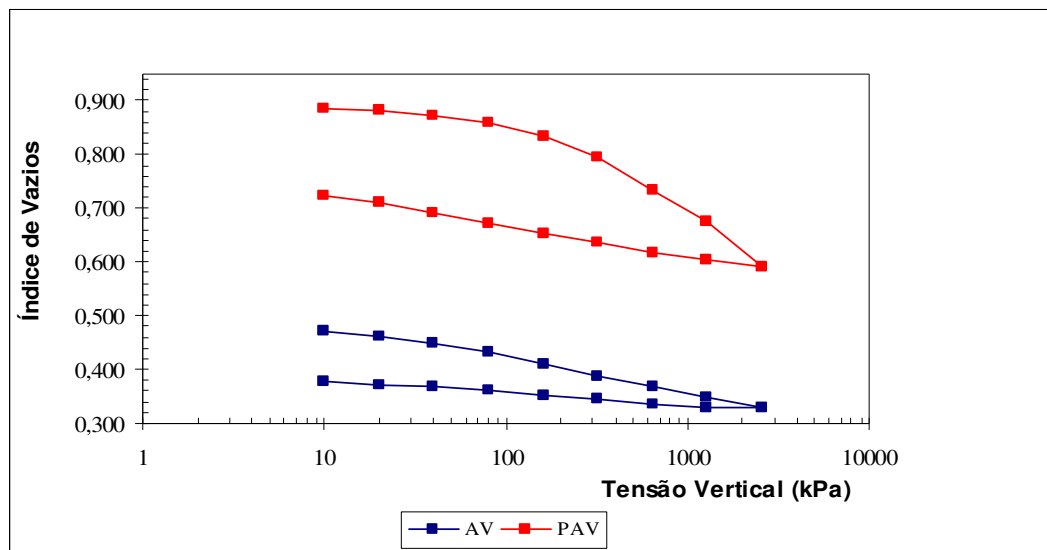


Figura 22: Resultado do ensaio de adensamento das amostras.

Pela análise da Figura 22 percebe-se que na amostra AV o índice de vazios para a tensão inicial de 10 KPa apresentou um valor de 0,472. Numa tensão de 2520 KPa o índice de vazios chegou a 0,328 e após aliviado a tensão no valor de 10 kPa o índice de vazios chegou a 0,376.

Observando os valores da amostra PAV nota-se que a uma tensão inicial o índice de vazios é igual a 0,886, praticamente o dobro da amostra AV. Na tensão de 2520 kPa o valor do índice foi de 0,590 e o valor para tensão inicial foi de 0,723.

A Tabela 14 apresenta o cálculo do coeficiente de adensamento. A Figura 23 apresenta a relação de cv com a tensão.

Tabela 14: Cálculo do coeficiente de adensamento

Tensão (KPa)	cv (10 ⁻² cm ² /s)	
	AV	PAV
80	2,07	2,19
160	2,02	2,14
320	1,96	2,07
640	1,90	1,96
1280	1,85	1,82
2560	1,78	1,68

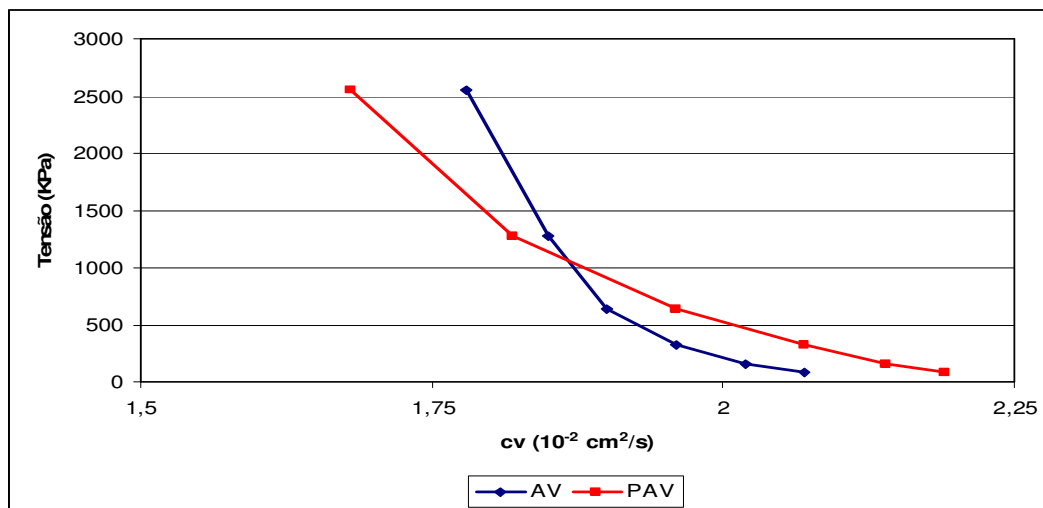


Figura 23: Relação do coeficiente de adensamento com a tensão.

Observa-se que com o aumento da tensão ocorre uma diminuição no valor de cv. A amostra PAV mostrou-se com valores pouco superiores aos da amostra AV, até a tensão de 640 KPa o que significa que a amostra AV possui maior capacidade de compressão do que a amostra PAV.

Percebe-se pelos valores encontrados de coeficiente de adensamento que estes ficaram dentro da faixa de pesquisas já realizadas em solos para cobertura de aterros e que reportaram valores em torno de 1 a 5 x 10⁻² cm²/s. [50]

4.9 Resistência ao Cisalhamento

A Tabela 15 apresenta as condições do corpo de prova no ensaio de resistência ao cisalhamento. Os corpos de prova foram moldados nas condições ótimas de compactação obtidas do ensaio de compactação. A umidade ótima obtida para a amostra de AV foi de 12,1% e para a amostra PAV foi de 29,7%. O índice de vazios obtido foi de 0,78 e 0,71 para AV e PAV, respectivamente.

Tabela 15: Parâmetros do corpo de prova no ensaio de resistência ao cisalhamento.

Parâmetros	AV	PAV
Densidade solo seco (g/cm^3)	1,55	1,148
Densidade dos sólidos (g/cm^3)	2,66	2,02
Índice de vazios	0,44	0,71
Umidade ótima (Wot)	12,10	29,7
Saturação (S %)	41	84

A Figura 24 apresenta o resultado do ensaio de resistência ao cisalhamento para a amostra AV nas tensões de 20, 50 e 100 KPa.

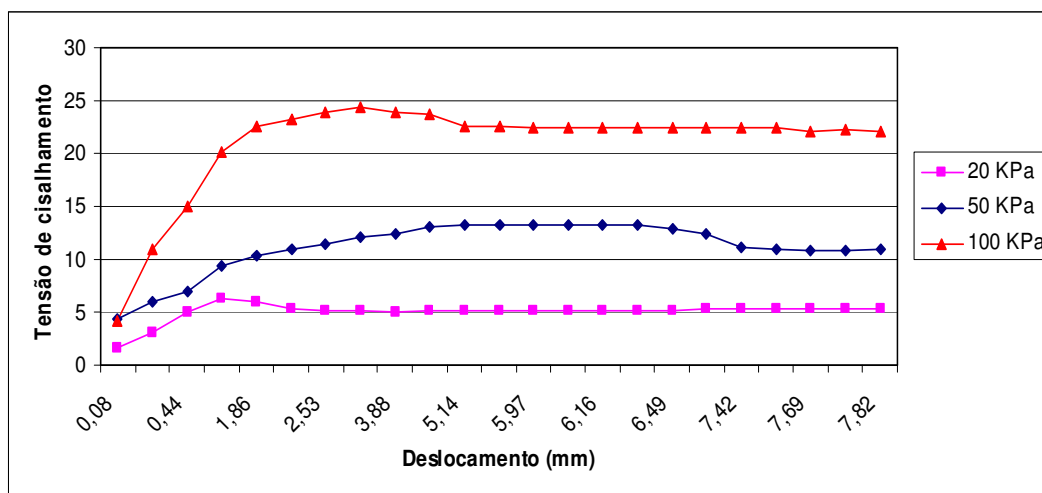


Figura 24: Cisalhamento da amostra AV

As curvas de tensão de cisalhamento seguiram o mesmo padrão para as três tensões normais aplicadas aos corpos de prova. Inicialmente a tensão de cisalhamento aumenta com o recalque sofrendo uma queda em um determinado momento e se estabilizando até o final do ensaio.

Aplicando uma tensão de 20 KPa observa-se que o máximo de tensão que se alcançou foi de 6 KPa e um recalque de 2,408 mm. A tensão foi reduzida para 5 KPa e se manteve neste patamar até o final do ensaio quando o recalque atingiu 7,82cm.

Na tensão de 50 KPa o máximo de tensão alcançado ficou em 13 KPa, porém observa-se que quando o recalque atingiu 3,450 mm houve uma diminuição para a tensão de 12 para 13 KPa e num valor de 4,70 mm a tensão diminuiu para 11 KPa.

Na tensão normal de 100 KPa o máximo de tensão de cisalhamento ficou no valor de 24 KPa, observa-se que também houve uma diminuição da tensão para o valor de 23 KPa quando o recalque atingiu 5,140 mm e após quando o recalque atingiu 5,970 mm a tensão de cisalhamento baixou para 22 KPa. A Tabela 16 apresenta o comparativo entre as tensões aplicadas e as alcançadas.

Tabela 16: Comparativo entre as tensões aplicadas e as tensões alcançadas para amostra AV.

Tensão aplicada (KPa)	Tensão alcançada (KPa)
20	6
50	13
100	24

A Figura 25 ilustra a envoltória de cisalhamento para a amostra AV.

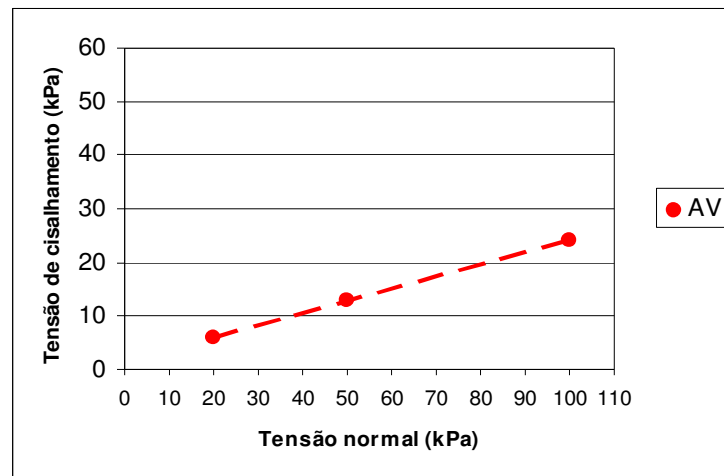


Figura 25: Envoltória de cisalhamento obtidas do ensaio para AV

A Figura 26 apresenta o resultado do ensaio de resistência ao cisalhamento para a amostra PAV nas tensões de 20, 50 e 100 KPa.

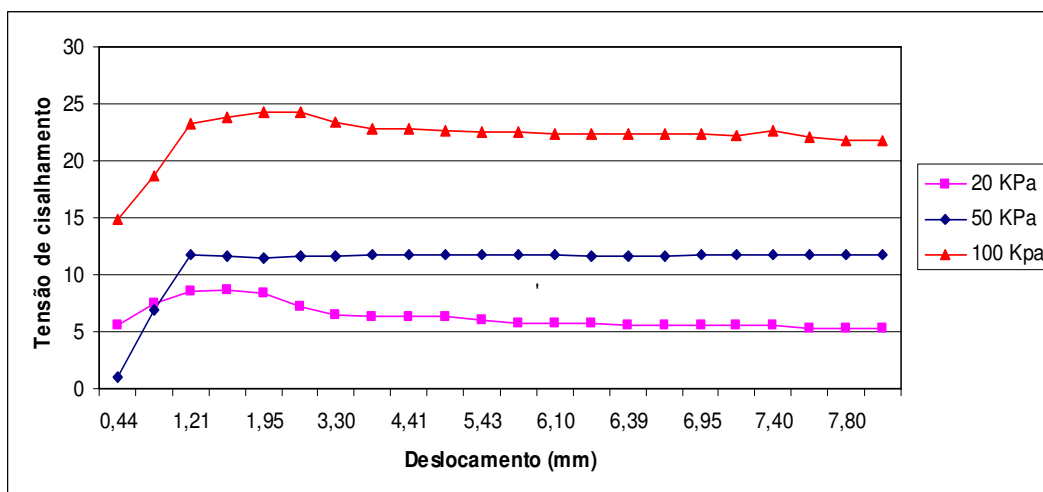


Figura 26: Cisalhamento da amostra PAV

Aplicando uma tensão de 20 KPa observa-se que a tensão máxima de cisalhamento alcançada foi de 9 KPa numa expansão de 0,69 mm, após houve uma diminuição da tensão para 5 KPa.

Na tensão de 50 KPa o máximo de tensão alcançado ficou em 12 KPa, numa expansão de 1,070 mm e manteve-se nesta tensão até o final do ensaio.

Na tensão de 100 KPa o máximo de tensão ficou no valor de 24 KPa, observa-se que também houve uma diminuição da tensão para o valor de 23 KPa numa expansão de 3,30 mm e após numa expansão de 5,44 mm a tensão caiu para 22 KPa.

Observa-se que a amostra AV obteve valor inferior de tensão em relação a PAV na tensão aplicada de 20 KPa, porém obteve valor superior na tensão aplicada de 50 KPa. Já na tensão de 100 KPa ambas amostras obtiveram o mesmo valor de tensão alcançada. A Tabela 17 apresenta um comparativo entre as tensões aplicadas e as alcançadas para a amostra PAV.

Tabela 17: Comparativo entre as tensões aplicadas e as tensões alcançadas para amostra PAV.

Tensão aplicada (KPa)	Tensão alcançada (KPa)
20	9
50	12
100	24

A Figura 27 ilustra a envoltória de cisalhamento para a amostra PAV.

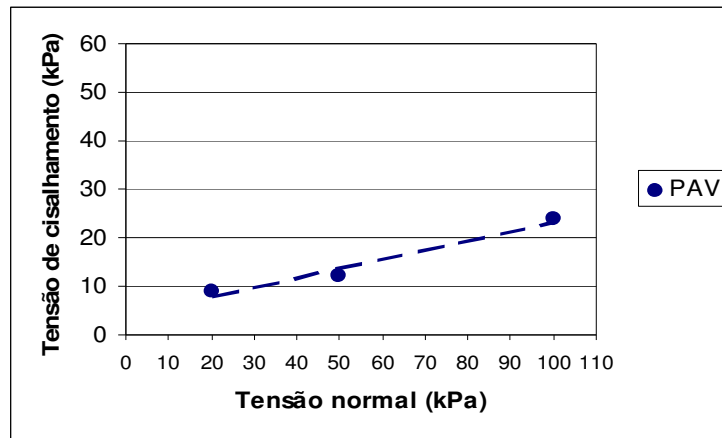


Figura 27: Envoltória de cisalhamento obtidas do ensaio para AV

A Tabela 18 apresenta o ângulo de atrito calculado a partir da envoltória de cisalhamento dos ensaios das amostras AV e PAV.

Tabela 18: Valores dos ângulos de atrito para as amostras.

Amostra	Valor do ângulo
AV	12,7°
PAV	10,6°

Pode ser analisado que a amostra PAV possui menor resistência ao cisalhamento do que a amostra AV. Em relação aos valores encontrados, estes estão abaixo dos valores encontrados em outras pesquisas com ADF (30° a 36°).

4.10 Ensaio de contração

As Figuras 28 e 29 apresentam os resultados da amostra AV. Pode-se observar que não houve o aparecimento de trincas neste material em nenhuma das caixas.

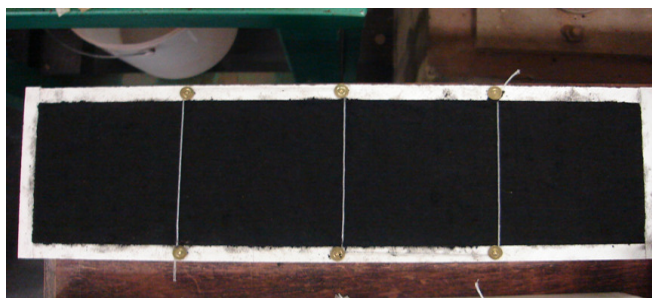


Figura 28: Trincas na amostra AV na caixa 40x10x5cm.

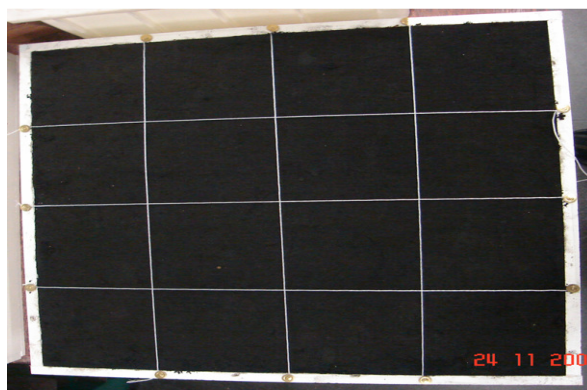


Figura 29: Trincas na amostra AV na caixa 40x10x10cm.

Em alguns estudos com ADF, observou-se o mesmo comportamento da amostra AV, ou seja, o não aparecimento de trincas em camadas utilizando este material. Neste caso o tamanho da superfície também não influenciou no aparecimento das trincas. [12]

As Figuras 30 e 31 apresentam as trincas que apareceram na caixa da amostra PAV.

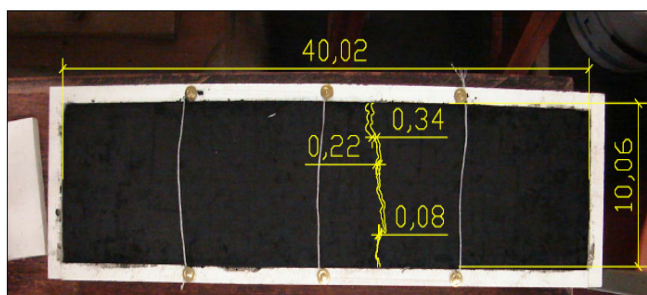


Figura 30: Trincas na amostra PAV na caixa 40x10x5cm

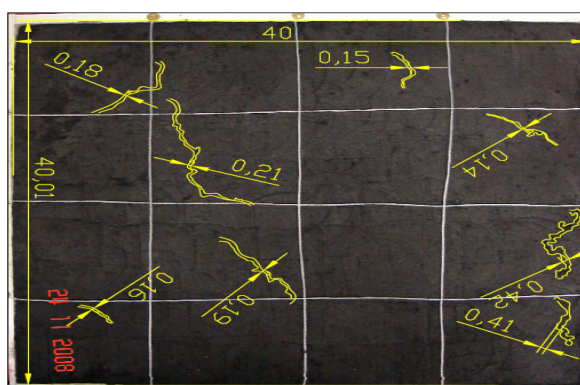


Figura 31: Trincas na amostra PAV na caixa 40x10x10cm

Foram observadas 8 trincas em uma área de 1.600 cm^2 da caixa $40 \times 40 \times 5$ e 1 trinca na área de 400 cm^2 da caixa menor ($40 \times 10 \times 5$). A maior trinca da segunda caixa apresentou abertura de $0,42 \text{ cm}$ e a menor no valor de $0,08 \text{ cm}$. A caixa menor apresentou uma trinca com abertura variando de $0,08$ a $0,22 \text{ mm}$. O somatório das aberturas foi de $0,64$ e $2,46 \text{ cm}$ da caixa menor e maior, respectivamente. Portanto a relação entre a abertura e a áreas das caixas foi de $0,0016$ e $0,0015/\text{cm}$ da caixa menor e maior respectivamente.

O aparecimento de trincas influencia no resultado de permeabilidade, o que não é ideal para uso em camadas de cobertura de aterros. Nos estudos onde houve o aparecimento de trincas em camadas de ADF foi sugerido a hidratação da bentonita para que não causasse este efeito. [12]

A Figura 32 apresenta os resultados de evaporação das caixas.

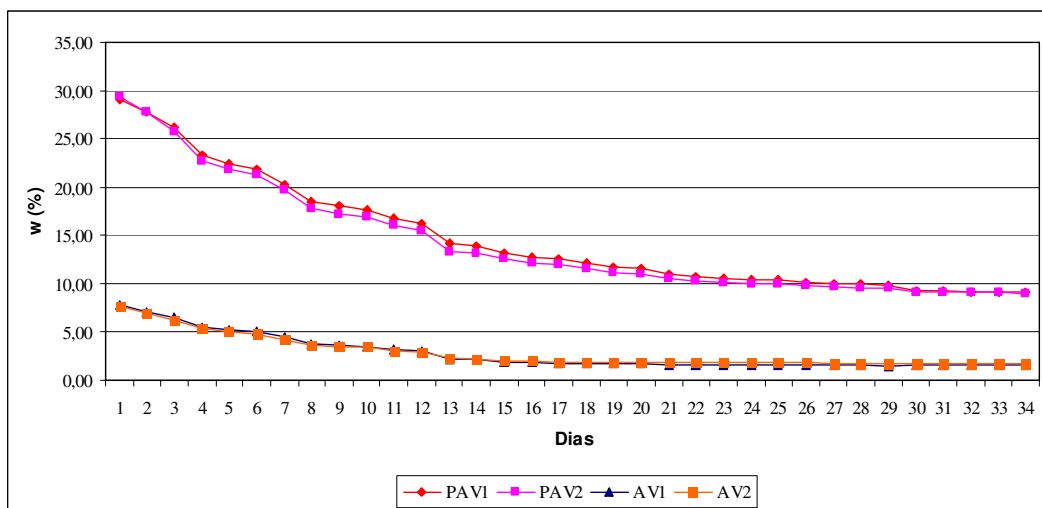


Figura 32: Resultado de evaporação das caixas

A amostra AV iniciou com umidade de 7,62% e chegou a 1,73% após os 30 dias de avaliação, já a PAV iniciou com 29,37% e finalizou com 8,96%. Pelos resultados observa-se uma perda de 22,70% na amostra AV e de 30,50% na amostra PAV. A maior umidade pode ter influenciado na perda de água com a consequente retração do material provocando as trincas

Também pode ser percebido que não houve influência da forma da caixa nem das eventuais trincas.

4.11 Lixiviação

A duas amostras analisadas são classificadas como classe II-A conforme encontrado nas pesquisas com ADF de areia verde. [9] A Tabela 19 apresenta os resultados do extrato aquoso neutro definido pela NBR 15.702 e a Tabela 20 apresenta resultados do extrato lixiviado conforme NBR 10.005.

Observam-se valores acima do permitido do parâmetro Ferro o que é comum em areias de fundição de ferro e do parâmetro sódio devido a característica da bentonita.

O Sódio é um parâmetro que já provém da bentonita adquirida para ser usada como matéria prima, podendo ser comparada a maior quantidade na amostra PAV que possui maior teor de bentonita. Os demais parâmetros encontraram-se todos dentro dos limites estabelecidos pela Norma.

Tabela 19: Resultados do ensaio extrato aquoso neutro

Parâmetros	Resultados das amostras		Limites NBR 15.702
	AV	PAV	
Cianeto (mg/L)	< 0,04	< 0,04	2,5
Cloreto (mg/L)	451	536	2500
Cobre (mg/L)	0,30	0,42	2,0
Fenol (mg/L)	0,24	0,49	14,0
Ferro (mg/L)	9,80	16,2	15,0
Fluoreto (mg/L)	0,45	0,30	0,5
Manganês (mg/L)	0,25	0,45	2,0
Níquel (mg/L)	<0,009	< 0,009	3,0
pH	9,66	7,43	5-10
Sódio (mg/L)	2460	2810	2500
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	2112	1130	5000
Sulfeto (mg/L)	<0,05	0,67	2500
Zinco (mg/L)	0,075	0,22	25,0

Tabela 20: Resultado do ensaio extrato lixiviado

Parâmetros	Resultados das amostras		Limites NBR 10.005
	AV	PAV	
Arsênio (mg/L)	<0,009	<0,009	0,50
Bário (mg/L)	0,23	0,15	10,00
Cádmio (mg/L)	<0,0001	<0,0001	0,10
Chumbo (mg/L)	0,001	0,007	0,50
Cromo (mg/L)	<0,009	<0,009	0,50
Mercúrio (mg/L)	<0,0005	<0,0005	0,02
pH	5,09	5,21	5-10
Selênio (mg/L)	<0,007	<0,007	0,10

Para visualizar de forma mais clara qual das amostras obteve melhor desempenho nos resultados, a Tabela 21 apresenta um comparativo entre as amostras e os resultados encontrados na literatura e os requisitos para os tipos de cobertura, sendo NE considerado como não encontrado.

Tabela 21: Comparativo entre as amostras conforme resultados.

Parâmetros	Resultados das amostras		Valores da literatura	Requisitos para camadas de cobertura
	AV	PAV		
Índices físicos				
Densidade dos sólidos (g/cm ³)	2,557 ± 0,1	2,021 ± 0,1	2,50-2,73	
Densidade do solo (g/cm ³)	2,011	1,489	1,3 a 1,9	
Índices de vazios	0,425	0,760	NE	0,5 a 1,5
Porosidade (%)	29,821	43,181	NE	30 a 70
Teor de umidade (%)	1,028 ± 0,05	7,028 ± 0,05	3-5	NE
Limite de Liquidez (%)	20,4 ± 0,1	72 ± 0,1	NE	30 a 60%
Índice de Plasticidade (%)	20,4	35,5		11 a 30%
Teor de Bentonita (%)	6	25	2-13%	NE
Análise Granulométrica	SC	MH	SP-SM	CL-CH-SC-OH
Compactação				
Umidade ótima (%)	12,10	29,7	8-12	NE
Permeabilidade (m/s)	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁴	10 ⁻⁸ – 10 ⁻⁹	10 ⁻⁸
Absorção	Grande capacidade tanto de absorver quando de perder água para o meio.	Grande capacidade tanto de absorver quando de perder água para o meio.	NE	NE
Adensamento				
Coefficiente de adensamento (10 ⁻² cm ² /s)	1,78-2,07	1,68-2,19	NE	1 a 5
Resistência ao cisalhamento				
Ângulo de atrito	26,3° – 29,9°	24,6° – 26,5°	28°	30°-36°
Ensaio de trincas	Não apresentou trincas	Apresentou trincas	Ausência de trincas	Não apresentar trincas
Lixiviação	Valores dentro dos limites das NBR 10.005 e NBR 15.702	Ferro e Sódio acima dos limites estabelecidos pela NBR 15.702	NE	Atender parâmetros das NBR 10.005 e NBR 15.702

Pode ser analisado que a amostra AV apresentou melhor desempenho no atendimento aos requisitos de camadas de cobertura. Ainda percebe-se que no parâmetro definido pela ABNT NBR 15.702 (lixiviação) somente a AV apresentou os valores permitidos.

Em relação ao ensaio de contração somente a amostra AV poderia ser utilizada em camadas de cobertura e revestimento do fundo.

Pode ser sugerida uma mistura entre as duas amostras que seria também viável para o atendimento a todos os parâmetros requisitados, ou ainda a mistura das amostras de ADF em solos argilosos, mas para isso seria necessária uma nova análise em laboratório de todos os parâmetros.

Portanto a ADF tem potencial para ser utilizada como camada impermeabilizante de fundo e cobertura substituindo o material utilizado atualmente que é o solo argiloso. Ainda a ADF pode ser utilizada como camada intermediária, pois atualmente costuma-se usar qualquer tipo de solo para esta camada. [42]

Ainda sugere-se aplicar a ADF em escala piloto na construção de camadas de cobertura e revestimento de fundo de aterros, pois a aplicação na prática pode revelar outras interferências que não podem ser observadas em laboratório.

4.12 Avaliação do impacto ambiental pelo uso de ADF como cobertura de aterro

4.12.1 Identificação dos impactos

As redes de impactos são métodos consagrados para a identificação dos impactos ambientais. É uma técnica de avaliação de impacto ambiental (AIA) especialmente interessante porque permite a rápida visualização de todos impactos envolvidos em uma atividade e ainda permite visualizar impactos secundários. Nas Figuras 33 e 34 são apresentadas as redes de impactos aplicadas à situação atual de uso de material argiloso em coberturas de aterros e a situação simulada com a substituição deste material por ADF respectivamente. Os impactos considerados podem ser divididos em duas grandes categorias: impactos resultantes do uso de material no processo produtivo de fundição de metais e impactos resultantes do uso de materiais para coberturas de aterros. [68]




Os impactos no meio ambiente mais expressivos são a saturação mais rápida dos aterros onde são dispostos e também porque poderia ter suas areias de rios e cavas preservadas usadas na construção civil se as AFD as substituíssem.

Em termos de efeitos na comunidade, se houvesse o reaproveitamento das ADF em camadas de asfalto, por exemplo, aumentaria o índice de pavimentação em locais onde este não existe, pois os custos seriam mais baixos.

Os impactos econômicos também são expressivos, principalmente para a indústria de Fundição. A Figura 33 apresenta a rede de impactos da forma como é feito o destino das ADF na atualidade e a Figura 34 apresenta a rede de impactos se a ADF substituísse o material utilizando normalmente para cobertura de aterros.

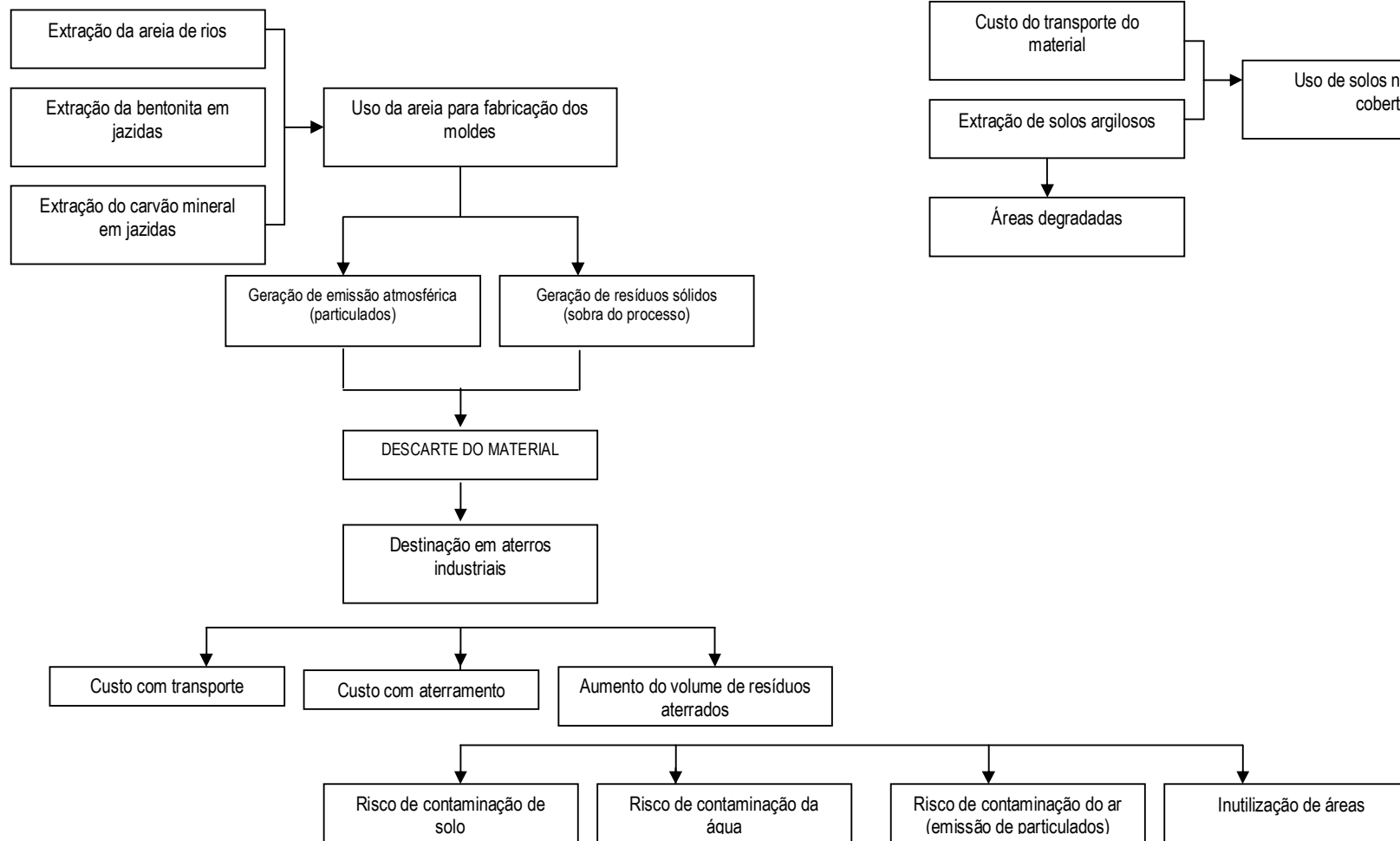
Na Tabela 22 pode ser observada a descrição dos impactos conforme o símbolo utilizado nas Figuras.

Tabela 22: Descrição dos impactos conforme símbolo.

Símbolo	Descrição
	Impactos Ambientais decorrentes da atividade
	Impactos que foram eliminados para a substituição do material proposto
	Impactos que foram acrescidos com o uso do material proposto

Em relação aos aterros de resíduos, por necessitarem de grandes áreas há a necessidade de transportar os materiais que o compõem a uma longa distância, provocando assim grande poluição com a queima de combustível fóssil e geração de resíduos de pneu, além dos prejuízos sócio-ambientais, danificando estradas e ruas devido ao grande tráfego de caminhões.

Impactos do uso da areia no processo produtivo de fundição de metal



Impactos do uso de solos argilosos como camadas

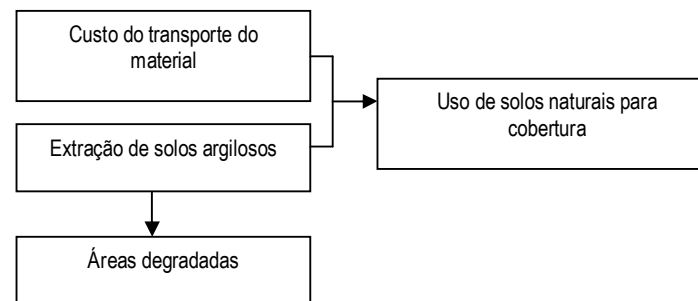


Figura 33: Rede de interação de impactos ambientais no processo atualmente utilizado

Rede de impactos com o uso da ADF como camadas de cobertura de aterros

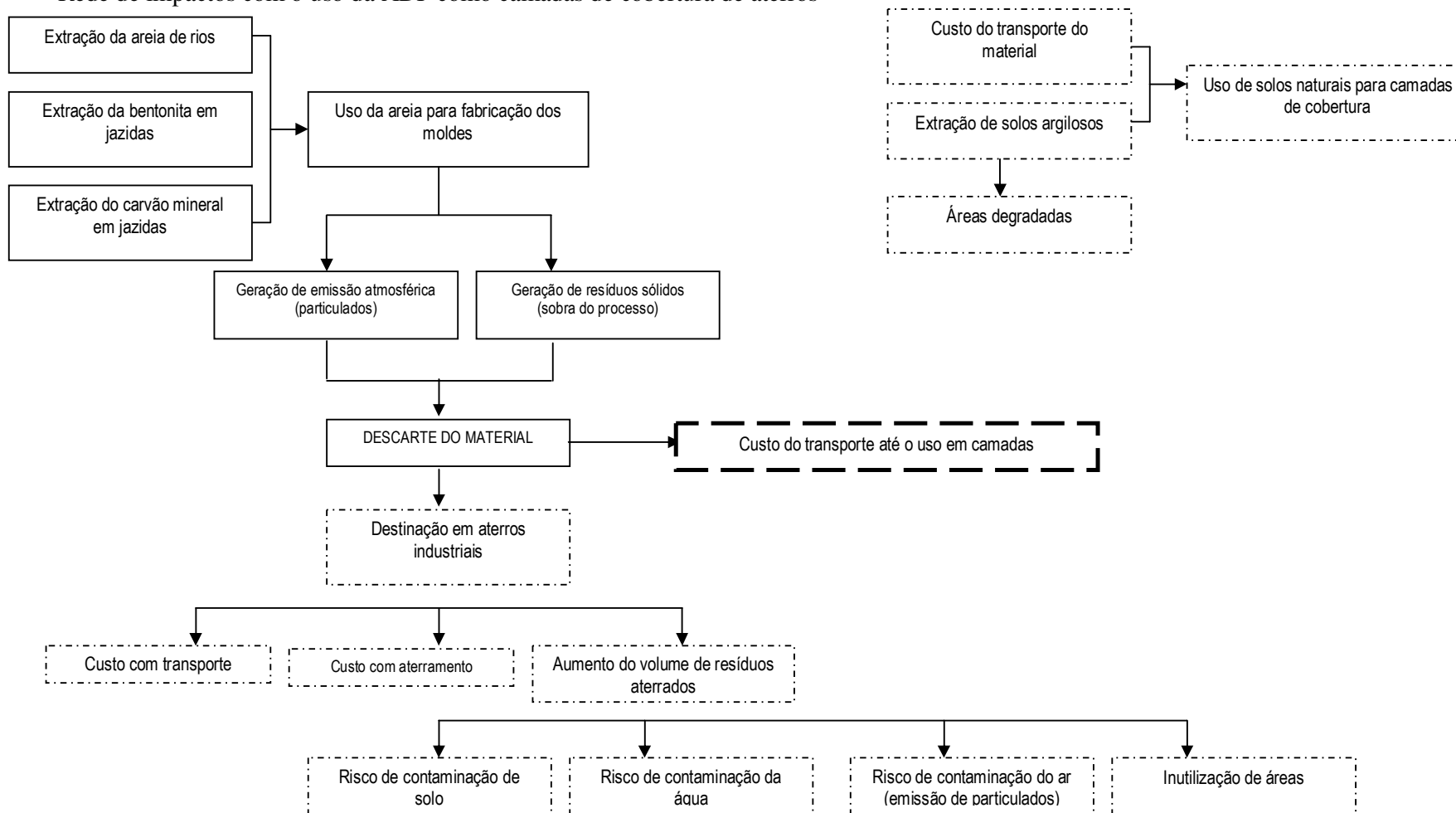


Figura 34: Rede de interação de impactos ambientais do processo utilizando ADF como cobertura de aterro

Pode ser observado a redução de um grande número de impactos ambientais e econômicos com a utilização da ADF como cobertura de aterro, em torno de 12 impactos são eliminados, e apenas um impacto é acrescentado.

Estes impactos eliminados compreendem todos os impactos associados à extração de solos argilosos tais como: o uso de solos naturais, o custo do transporte do material e às áreas degradadas decorrentes desta extração.

Ainda elimina-se todos os impactos decorrentes da destinação das ADF em aterros industriais tais como o custo com transporte, o aumento do volume de resíduos aterrados, o risco de contaminação de solo, o risco de contaminação da água, o risco de contaminação do ar (emissão de particulados) e as inutilizações de áreas.

Assim percebe-se que os impactos eliminados mais importantes são aqueles associados à extração da argila e à destinação das ADF nos aterros. Estes impactos são quantificados a seguir.

4.12.2 Quantificação dos impactos ambientais

Considerando um aterro típico para uma população de 10.000 habitantes onde os dados de projeto podem ser visualizados na Tabela 23.

Tabela 23: Dados de um aterro

Parâmetro	Valores
Volume de resíduo	60.279 m ³
Área do aterro	11.700 m ²
Volume do aterro	78.500 m ³
Vazão de percolado	9,7 m ³ /mês

Assim considerando que do volume total de um aterro 20% correspondem a argila utilizada em camadas de cobertura e intermediárias, então tem-se uma necessidade de 15.700 m³ de argila. Considerando a massa específica de um solo argiloso de 2,72 g/cm³ tem-se um total de 7,55 toneladas necessárias de argila utilizadas neste aterro.

5 CONCLUSÕES

É possível afirmar que a amostra AV foi a mais indicada para uso como material alternativo em camadas de cobertura de aterros, com base nos seguintes resultados:

- ✓ Em relação aos índices físicos pode-se concluir que para o parâmetro densidade dos sólidos a amostra AV apresentou valores semelhantes a outras pesquisas com ADF e a amostra PAV apresentou valor mais baixo. Para os parâmetros densidade do solo e índice de vazios somente a amostra PAV alcançou valores dentro da indicação para uso em camadas de cobertura de aterros, porém os valores da amostra AV ficaram próximos ao indicado, não inviabilizando o uso desta amostra. Já para o parâmetro porosidade somente a amostra AV apresentou valores dentro da faixa indicada. Em relação ao teor de umidade os resultados encontrados não foram semelhantes a outros estudos de ADF.
- ✓ Os valores encontrados para os limites de Atterberg permitem concluir que nenhuma das amostras ficou dentro da faixa indicada para o limite de liquidez, porém em relação ao índice de plasticidade a amostra AV apresentou resultado satisfatório para uso em coberturas;
- ✓ Para o teor de bentonita foram encontrados valores superiores a outros estudos com ADF. Este resultado foi fator determinante para os demais pois se reflete em outras características do material;
- ✓ Em relação ao ensaio de granulometria pode ser afirmado que os resultados alcançados foram diferentes dos outros estudos com ADF e que somente a amostra AV apresentou classificação ideal para o uso em coberturas de aterros;
- ✓ Os resultados apresentados de compactação refletem em dados importantes para projetos de aterros. A amostra AV apresentou valor muito semelhante ao valor encontrado em outros estudos, ao contrário da amostra PAV onde o valor foi diferente;
- ✓ A permeabilidade é um dos parâmetros mais importantes e ambas as amostras apresentaram resultados satisfatórios para uso em cobertura de aterros;
- ✓ O ensaio de absorção permitiu concluir que ambas as amostras quando submetidas a ambientes muito secos ou muito úmidos apresentam grande capacidade tanto de absorver quando de perder água para o meio;
- ✓ A amostra PAV possui maior capacidade de reter umidade do que a amostra AV. Cabe ressaltar que a amostra PAV possui maior teor de argila o que explica este comportamento.

- ✓ O coeficiente de adensamento também é um parâmetro importante para o projeto e percebe-se que os valores encontrados ficaram dentro da faixa de pesquisas já realizadas em solos para cobertura de aterros;
- ✓ A amostra PAV possui menor resistência ao cisalhamento do que a amostra AV. Em relação aos valores encontrados, estes são abaixo dos valores de outras pesquisas com ADF.
- ✓ Em relação ao ensaio de contração pode ser afirmado que somente a amostra AV apresentou resultados satisfatórios para uso em coberturas de aterros;
- ✓ E também somente a amostra AV atendeu aos requisitos do ensaio de lixiviação definido como o único parâmetro a ser atendido, segundo a NBR 15.702, para uso em coberturas de aterros;
- ✓ Ressalta-se a possibilidade de eliminação de impactos ambientais decorrentes da aplicação de ADF em coberturas de aterros. Em torno de 12 impactos ambientais seriam eliminados se ocorresse a substituição de materiais argilosos em coberturas de aterros por ADF;

6 RECOMENDAÇÕES

Para a continuidade do trabalho recomenda-se:

- ✓ Estudos práticos na utilização das mostras, pois ensaios de laboratório são diferentes do campo;
- ✓ Análises de mistura das duas amostras, pois podem apresentar resultados satisfatórios;

7 REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. *Índices de mercado*. Disponível em: <<http://www.abifa.org.br>> Acesso: em fevereiro 2009
- [2] SIDDIQUE, R., SCHUTTER, G. NOUMOWE, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. *Construction and building Materials*, In Press, 2008.
- [3] GUNNEY, Y. AYDILEK, A.H.DEMIRKAN,M.M. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste management*, V. 26, p. 932-945, 2006.
- [4] FOUNDRY INDUSTRY RECYCLING STARTS TODAY (FIRST). *Foundry Sand in Landfill Liners and Covers*. Disponível em <www.foundryrecycling.org>. Acesso em Abril de 2007.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). *Guia ABIFA de Fundição 2008*. p.02-05, 2008.
- [6] GIÃO D. *Material de aula da disciplina Fundição II*. Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, 2001.
- [7] ZANETTI, M.C. FIORE, S. Foundry processes: the recovery of green moulding sands for core operations. *Resources Conservation e Recycling*, V.38, p. 243-254, 2002
- [8] LENAHAN, M. *Foundry Sand: a recipe for beneficial use*.2002. Disponível em <http://www.solucoesadf.com.br/img_paginas/beneficial_reuse_foundry_sand.pdf> Acesso em Nov. 2008.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10.004*. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- [10] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *-Foundry Sand Facts for Civil Engineers, 2004*. Washington, DC7 Gov. Print. Off. 2003. Disponível em <<http://www.epa.gov/osw/conserva/rrr/imr/foundry/>>. Acesso em março 2007.
- [11] GOODHUE, M. J. TUNCER, B. E., BENSON, C. H. Interaction of Sand with geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V. 127, 2001.
- [12] ABICHOU, T. BENSON, C.H. EDIL, T.B.. Foundry green sands as hydraulic barriers: laboratory study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. P. 1174-1183, 2000.

- [13] DUNGAN, R.S. KUKIERN, U., LEE, B. Blending foundry sands with soil: Effect on dehydrogenase activity. *Science of the Total Environment*, 2006.
- [14] DUNGAN, R.S. DEES, N.H. The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands. *Journal of environmental management*, In Press, 2007.
- [15] WAN, S.J. FAN, Z. The toxic compounds and leaching characteristics of spent foundry sands. *Water, air and soil pollution*, V. 132, p. 347-364, 2001.
- [16] LUKIANTCHUKI, J. A. *Influência do teor de bentonita na permeabilidade e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante*. 2007. Dissertação (metrado em geotecnia). São Paulo, 2007.
- [17] AMORIM, C. L. G. *Estudo do efeito das interações água-argila no inchamento de argilominerais através da difração de raios X*. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ, 2007.
- [18].KAWATRA S.K.RIPKE S.J. Developing and understanding the bentonite fiber bonding mechanism. *Minerals Engineering*, V. 14, p. 647-659, 2001.
- [19] SÄLLFORS, G. ÖBERG-HÖGSTA, A.L. Determination of conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical and Geological Engineering*, V. 20, p. 65-80, 2001.
- [20] DE LEON, A. T. et al. Remoção de íons de metais pesados com bentonitas modificadas. Disponível em http://www6.ufrgs.br/ltm/attachments/219_Remoçãoions5a.pdf. Acessado em Agosto de 2008.
- [21] KAYABALI, K. KEZER, H. Testing the ability of bentonite-amended natural zeolite to remove heavy metals from liquid waste. *Environmental Geology*, 1998.
- [22] HEINECK, K.S. et al. Estudo da Morfologia e permeabilidade de misturas de cinza de carvão-bentonita. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Brasília: *Anais...* Brasília, v.2, p. 1237-1242.
- [23] REZENDE, M., M. *Bentonita*. Disponível em www.dnpm.gov.br. Acessado em Janeiro de 2009.
- [24] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Anuário Mineral Brasileiro*. Disponível em www.dnpm.gov.br. Acessado em Janeiro de 2009.
- [25] MATOS, S.V. SCHALCH, V. Alternativas de minimização de resíduos da indústria de fundição. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental Foz do Iguaçu: *Anais...* Foz do Iguaçu, 1997, p. 1742-1754.
- [26] *Projeto de Lei nº 1991/07*. Política Nacional de resíduos sólidos. Disponível em <http://www.camara.gov.br/sileg/integras/501911.pdf>. Acesso em Jan. de 2008.

- [27] SCHEUNEMANN, R. Regeneração de areia de fundição através de tratamento químicos via processo fenton. Dissertação (mestrado em Engenharia Química).. Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.
- [28] DENG,A. TIKALSKY, P. J. Geotechnical and leaching properties of flowable fill incorporating waste foundry sand. *Waste management*, In Press, 2007.
- [29] BILOLO, 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
- [30] GIBBS, S. Saving on Sand Disposal. *Modern casting*,V.35, p. 35-39. 2007.
- [31] _____.ABNT. *NBR 15.702 – Areias descartadas de fundição – aplicações em asfalto e em aterro sanitário*. São Paulo, 2008.
- [32] LEE, T. BENSON, C.H. et al. Waste green sands as reactive media for groundwater contaminated with trichloroethylene (TCE). *Journal of hazardous materials*, p.25-36, 2004.
- [33] CASTILHOS, J.A.B. (coordenador) *Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d' água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários*. Rio de Janeiro: ABES, projeto PROSAB, 2006.
- [34] GOMES, L.P. MORAES, C.A.M. BOFF, R.D. Emprego de areia usada de fundição em coberturas intermediária e final de aterros sanitários de RSU. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, V.3, p. 71-76, 2007.
- [35] INSTITUTO BRASILEIRA DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa Nacional e Saneamento Básico – Lixo*. 2002. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm>>. Acesso em Jan. de 2008.
- [36] FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (FEPAM). *Relatório sobre a geração de resíduos sólidos no Estado do Rio Grande do Sul*. 2003. Disponível em <<http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/rsi>>. Acesso em Ago. 2007.
- [37] MIURA, N. CHAI, J.C. Comparing the performance of landfill liner systems. *Mater Cycles. Waste management*, V.4, p. 135-142, 2002.
- [38] _____.*NBR 10157*. Aterro de Resíduos Perigosos – Critérios para Projeto, Construção e Operação . Rio de Janeiro,1987.
- [39] _____.*NBR 13896*. Aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação.Rio de Janeiro,1997.

- [40] MEER, S.R. BENSON, C.H. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V. 133, 2007.
- [41] RIZZO, R.P. LOLLO, J.A. Capacidade de retenção de barreiras de proteção produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente. *Revista engenharia sanitária e ambiental*, V. II, p. 250-259, 2006.
- [42] REICHERT, G.A. *Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários*. UCS. Curso de Engenharia Ambiental (Apostila). 2007.
- [43] BOSCOV, M.E.G. *Geotecnia Ambiental*. São Paulo: Oficina de textos, 2008.
- [44] TCHOBANOGLOUS, G. et al. *Integrated Solid Waste Management – engineering principles and management issues*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [45] QASIM, S.R. CHIANG, W. *Sanitary Landfill Leachate – generation, control and treatment*. USA: Technomic Publishing, 1994.
- [46] SIMÕES, G.F. et al. Avaliação qualitativa do desempenho de dois sistemas de cobertura final de um aterro sanitário experimental. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Rio de Janeiro: *Anais...* Rio de Janeiro, 2008. CD-ROM
- [47] ROCCA, A.C. et al. *Resíduos Sólidos Industriais*. São Paulo: CETESB, 1993.
- [48] MACAMBIRA, I. Q. *Comportamento hidráulico de alguns solos lateríticos par uso como barreira impermeável*. 2002. 110p. Dissertação (mestrado em geotecnia). USP-São Carlos.
- [49] ORTIGÃO, J.A.R. *Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos*. São Paulo: Terratec, 2007.
- [50] PINTO, C.S. *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo: oficina de textos, 2002.
- [51] TUCCI, C. E.M. *Hidrogeologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: ABRH, 2001.
- [52] FILHO, do N. I. *Estudo de compostos orgânicos em lixiviado de aterro sanitário*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002. Tese (doutorado em química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- [53] TEIXEIRA, P.F. *Investigação sobre as características geotécnicas de um resíduo de papel*. Universidade de São Paulo. 2002. Dissertação (mestrado em engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [54] COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). *Decisão de diretoria nº 152/2007*. Disponível em

- http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/residuos/ger_areia_fund.asp. Acesso em Maio de 2007.
- [55] CARNIN, R.L.P. *Resolução CONSEMA 011/2008*. Disponível em <http://www.acij.com.br/uploads/banco_conhecimento/321e239c75a19788673dde6a2a9a7f45.pdf>. Acesso em out. 2008.
- [56] _____. FEPAM. *Resolução CONSEMA nº 073/2004*. Disponível em <http://www.fepam.rs.gov.br/consema/Res073-04.pdf>. Acesso em Dez. de 2009.
- [57] _____. NBR 6457. Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- [58] CAUDURO, F.A.DORFMAN, R. *Manual de ensaios de laboratório de campo para irrigação e drenagem*. Porto Alegre: PRONI, 2002.
- [59] _____. NBR 6457. Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- [60] _____. NBR 6459. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- [61] _____. NBR 7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- [62] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL STANDARDS (ASTM) C837. Standard test method for methylene blue index of clay. Philadelphia, 1992.
- [63] _____. NBR 7181. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- [64] _____. NBR 7182. Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- [65] _____. ASTM D 5084 -90. *Standard Test Method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. American Society for testing and materials. 1990.
- [66] WADA, L. M. Métodos laboratoriais para determinação da curva característica e equações para o seu ajuste. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Rio de Janeiro: *Anais...* Rio de Janeiro, 2008. CD-ROM
- [67] MOREIRA, I.V.D. *Origem e síntese dos principais métodos de avaliação de impacto ambiental (AIA)*. Paraná: MAIA, 1992.
- [68] CANTER, L. W. *Manual de evaluación de impacto ambiental*. 2 ed. Madri: McGraw Hill Espanha, 1998