



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

SANDRO VANILSON LOEBENS

**ANÁLISE DA COMPACIDADE E DA RESISTÊNCIA DA MISTURA DE AREIA DE
FUNDIÇÃO COM SOLO ARGILOSO**

CERRO LARGO

2018

SANDRO VANILSON LOEBENS

**ANÁLISE DA COMPACIDADE E DA RESISTÊNCIA DA MISTURA DE AREIA DE
FUNDIÇÃO COM SOLO ARGILOSO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária da Universidade Federal da Fronteira
Sul.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vendruscolo

CERRO LARGO

2018

PROGRAD/DBIB - Divisão de Bibliotecas

Loebens, Sandro Vanilson

Análise da compacidade e da resistência da mistura de areia de fundição com solo argiloso/ Sandro Vanilson Loebens. -- 2018.

57 f.:il.

Orientador: Márcio Antônio Vendruscolo.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de , Cerro Largo, RS, 2018.

1. Resíduo de Areia de Fundição. 2. Solos compactados. 3. Compacidade e Resistência.. I. Vendruscolo, Márcio Antônio, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

SANDRO VANILSON LOEBENS

ANÁLISE DA COMPACIDADE E DA RESISTÊNCIA DA MISTURA DE AREIA DE
FUNDIÇÃO COM SOLO ARGILOSO

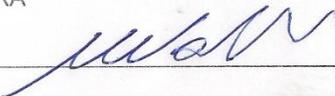
Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito para
obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade
Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vendruscolo

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

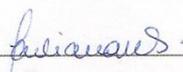
11 / 07 / 2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr.º Mario Sergio Wolski – UFFS

Membro da Banca



Prof.ª Dr.ª - Juliana Marques Schöntag – UFFS

Membro da Banca



Prof. Dr.º Márcio Antônio Vendruscolo

Orientador

Dedico este trabalho a meus pais, Valmir e Leoni e a meu irmão Leandro, e a todos que de alguma forma me apoiaram durante minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais Valmir e Leoni e a meu irmão Leandro que nunca mediram esforços para me ajudar a realizar esta importante etapa da minha vida.

Agradeço ao professor orientador Márcio Antônio Vendruscolo, pela sua orientação e incentivo na elaboração deste trabalho de conclusão, pela disponibilidade, apoio e amizade.

Ao professor coordenador do curso Bruno München Wenzel, pelo companheirismo, auxílio e ensinamentos ao longo da graduação.

A todos os professores do curso de Engenharia Ambiental, por serem profissionais inspiradores que contribuíram com minha formação acadêmica e pessoal.

A Universidade Federal da Fronteira Sul pela oportunidade de ter acesso a um ensino de qualidade.

Aos meus amigos mais próximos que fiz durante a graduação, pelos inúmeros momentos de alegria convividos juntos e pelo apoio nos momentos de dificuldade.

Aos colegas de curso, pelas alegrias e dificuldades compartilhadas durante esse período de graduação.

A A. J. Borghetti Fundação e Usinagem e seus responsáveis por terem cedido o material para que esta pesquisa pudesse ser realizada.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para que eu chegasse a este momento especial.

RESUMO

Os elevados custos de descarte da areia de fundição para as empresas geradoras e as suas boas propriedades para utilização em construção civil têm estimulado pesquisas de alternativas para o seu reuso e, nesse sentido, a sua reutilização em aterros compactados oferece oportunidades para o gerenciamento de areia de fundição usada. Segundo a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), estima-se que em 2012 foram produzidas cerca de 3 milhões de toneladas de areia de fundição no Brasil. A principal destinação destes resíduos atualmente se dá em aterros de descarte industrial que, além de terem um alto custo, constituem-se em preocupação ambiental cada vez maior às empresas. Este trabalho teve como objetivo combinar o resíduo de Areia de Fundição proveniente do jateamento das peças em misturas com 35%, 50% e 65% de areia de fundição com um solo argiloso e comparar os resultados de compactação e compressão simples com o solo natural, 0% de areia de fundição, de forma a constituir um novo material que possa ser utilizado como base de fundações superficiais ou como aterros para a construção de estradas. Primeiramente foram realizados ensaios de caracterização do solo e da Areia de Fundição. Posteriormente realizou-se ensaios de compactação e compressão simples. Os ensaios de compactação comprovaram que com a adição de Areia de Fundição, há uma redução da umidade ótima e um aumento na densidade aparente seca máxima da mistura, sendo que o melhor resultado foi obtido na mistura de 65% de areia de fundição. Já os ensaios de resistência à Compressão Simples mostraram que o solo natural, ou seja, com 0% de areia de fundição resiste a uma tensão maior antes do rompimento em relação as misturas de solo e areia. Embora inicialmente a resistência tenha diminuído com a adição da areia de fundição ao solo, observa-se um aumento proporcional ao teor adicionado a partir de 35%.

Palavras-Chave: Resíduo de Areia de Fundição. Solos compactados. Compacidade e Resistência.

ABSTRACT

The high costs of casting sand disposal for generating companies and its good properties for civil construction have stimulated research into alternatives for its reuse and, in this sense, its reuse in embankments offers alternatives for the used casting sand management. According to the Brazilian Foundry Association (ABIFA), it is estimated that in 2012, 3 million tons of casting sand were produced in Brazil. The current main destination of this waste are industrial landfills, which besides having a high cost, are a growing environmental concern for companies. This work had the goal of combining the casting sand waste, coming from pieces sandblasting, in mixtures of 35%, 50% and 65% of blasting sand with a clay soil and compare the compaction results and simple compression with the natural soil, 0% of blasting sand, in order to develop a new material that can be used in superficial foundations of in embankments for roads construction. At first, characterization tests of the soil and casting sand were performed. Next, compaction and simple compression test were performed. The compaction tests showed that with the addition of casting sand there is a reduction in the optimal humidity and an increase in the maximum dry apparent density of the mixture, being the best result obtained with the mixture of 65% of casting sand. The simple compression resistance tests showed that the natural soil, which means, that is, with 0% casting sand resists to higher tension before its rupture in comparison with the mixtures of soil and sand. Although initially the resistance decreased with the addition of casting sand to the soil, it was observed that there is an increase proportional to the added percentage after 35%.

Keywords: Casting Sand Waste. Compacted Soils. Compactness and Resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de fundição.	15
Figura 2 - Representação esquemática da fundição em molde de areia.	16
Figura 3 - Geração de Resíduo Sólido Industrial Classe I por setor industrial.	19
Figura 4 - Destinação dos Resíduos Sólidos Industriais Classe I. Erro! Indicador não definido.	
Figura 5 - Geração de Resíduo Sólido Industrial Classe II por setor industrial. ... Erro! Indicador não definido.	
Figura 6 - Destinação dos Resíduos Sólidos Industriais Classe II. Erro! Indicador não definido.	
Figura 7 - Caracterização e classificação de resíduos.	23
Figura 8 – Classes de solo.	28
Figura 9 – Mapa de solos do Rio Grande do Sul.	30
Figura 10 – Compactação de solo em vias.	31
Figura 11 – Fundação de residência.	32
Figura 12 – Exemplo de curva de compactação.	33
Figura 13 - Solo utilizado nos ensaios.	35
Figura 14 – Almofariz e pistilo.	36
Figura 15 – Ponto de coleta do solo.	36
Figura 16 – Areia de fundição utilizada nos ensaios.	37
Figura 17 – Peneiras usadas nos ensaios de granulometria.	39
Figura 18 - Granulometria do solo da UFFS campus Cerro Largo –RS.	40
Figura 19 – Aparelho de Casagrande.	40
Figura 20 – Limite de liquidez.	41
Figura 21 – Cilindro utilizado nos ensaios de compactação.	43
Figura 22 - Ensaio de Proctor Normal.	43
Figura 23 – Prensa hidráulica.	44
Figura 24 – Curva Granulométrica da Areia de Fundição.	45
Figura 25 – Curvas de compactação do solo e da mistura solo-areia de fundição. ...	47
Figura 26 - Moldes utilizados nos ensaios de compressão simples.	48
Figura 27 - 0% de areia de fundição.	48
Figura 28 - 35% de areia de fundição.	49
Figura 29 - 50% de areia de fundição.	49
Figura 30 - 65% de areia de fundição.	50
Figura 31 - Tensão máxima média para cada % de ADF.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Abertura das peneiras utilizadas na análise granulométrica	27
Tabela 2 – Composição da amostra de solo e areia de fundição.....	38
Tabela 3 – Abertura das peneiras utilizadas na análise granulométrica	39
Tabela 4 – Densidade real dos grãos da Areia de Fundição.....	46
Tabela 5 – Valores de densidade aparente seca máxima e umidade ótima	47
Tabela 6 – Tensões máximas necessárias para o rompimento dos moldes	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO	14
2.2 AREIA DE FUNDIÇÃO	16
2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL.....	18
2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ADF SEGUNDO AS LEGISLAÇÕES ..	22
2.5 PROBLEMATICA DO DESCARTE DA ADF	24
2.6 ESTUDOS SOBRE A REUTILIZAÇÃO DA ADF	25
2.7 SOLOS.....	26
2.7.1 Tipos de solo	28
2.7.2 Latossolos	29
2.7.3 Solos compactados	31
3 MATERIAS E MÉTODOS.....	35
3.1 MATERIAIS	35
3.1.1 Solo	35
3.1.2 Areia de fundição	37
3.2.3 Água destilada.....	37
3.2 MÉTODOS	38
3.2.1 Umidades	38
3.2.2 Granulometria.....	38
3.2.3 Limites de Atterberg	40
3.2.4 Densidade real dos grãos.....	42
3.2.5 Ensaio de compactação (proctor normal)	42
3.2.6 Ensaio de resistência à compressão simples	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 GRANULOMETRIA	45
4.1.1 Areia de fundição	45
4.2 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	46

4.2.2 Densidade real dos grãos de areia de fundição	46
4.4 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR NORMAL)	46
4.5 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES	47
5 CONCLUSÃO.....	52

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de resíduos sólidos gerados no setor industrial, tem se tornado um grande problema para as empresas. Existe uma busca constante destas empresas por novas alternativas para destinação de seus resíduos para reduzir seu impacto ao ambiente. As indústrias de fundição, mesmo reutilizando sucatas metálicas como matéria prima, produzem grandes quantidades de Areia de Fundição (ADF), que são utilizadas como moldes para as peças fundidas. (OLIVEIRA, 2016)

Segundo a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) (2012), estima-se que em 2012, foram produzidas cerca de 3 milhões de toneladas de ADF por ano no Brasil. A principal destinação destes resíduos atualmente se dá em aterros de descarte industrial que, além de terem um alto custo, constituem-se em preocupação ambiental cada vez maior às empresas. Além da geração de resíduos sólidos, é necessário relatar que as indústrias de fundição e metalúrgicas possuem uma expressiva contribuição quanto aos impactos gerados no meio ambiente, em seu processo industrial, consumo de recursos energéticos e utilização de matérias-primas. (ABIFA, 2012)

Conforme as legislações vigentes no Brasil, areias de fundição são classificadas como um resíduo classe II-A não inerte, devido à lixiviação de íons metálicos. Já há algum tempo pesquisadores mostram que a maioria das areias verdes do processo de moldagem possuem concentrações orgânicas semelhantes às aquelas encontradas em solos naturais e não são perigosas à natureza. (OLIVEIRA, 2016)

Diante deste panorama, universidades e empresas vêm desenvolvendo pesquisas para encontrar alternativas para a reutilização da areia de fundição com fins lucrativos. As aplicações mais comuns são na área da construção civil, através da utilização da ADF para produção de concreto, materiais cerâmicos, tijolos, entre outros. (OLIVEIRA, 2016).

Diante deste cenário, o presente trabalho traz uma alternativa para a reutilização da ADF, que seria a sua incorporação em solos compactados para a construção de aterros, realizando-se testes de granulometria, densidade real dos grãos, proctor normal, ensaios de resistência a compressão simples utilizando resíduo

de ADF da empresa de fundição A. J. Borghetti Fundição e Usinagem, situada em Cerro Largo – RS.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar se a ADF misturada ao solo em teores de 35%,50% e 65%, pode ser utilizada como material para aterros compactados.

1.1.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, podemos destacar os seguintes objetivos específicos:

- a) Executar os ensaios de caracterização do solo e da areia de fundição como a granulometria e a densidade real dos grãos;
- b) Determinar os parâmetros de compactação dos materiais através do método de proctor normal;
- c) Avaliar a resistência à compressão simples do solo compactado com areia de fundição.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais processos envolvidos na indústria de fundição, os tipos de areia utilizados, bem como sua classificação como resíduo de acordo com as normas vigentes. Também é discutido o porquê desse resíduo ser um problema para as indústrias de fundição e como ele pode ser reutilizado.

2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

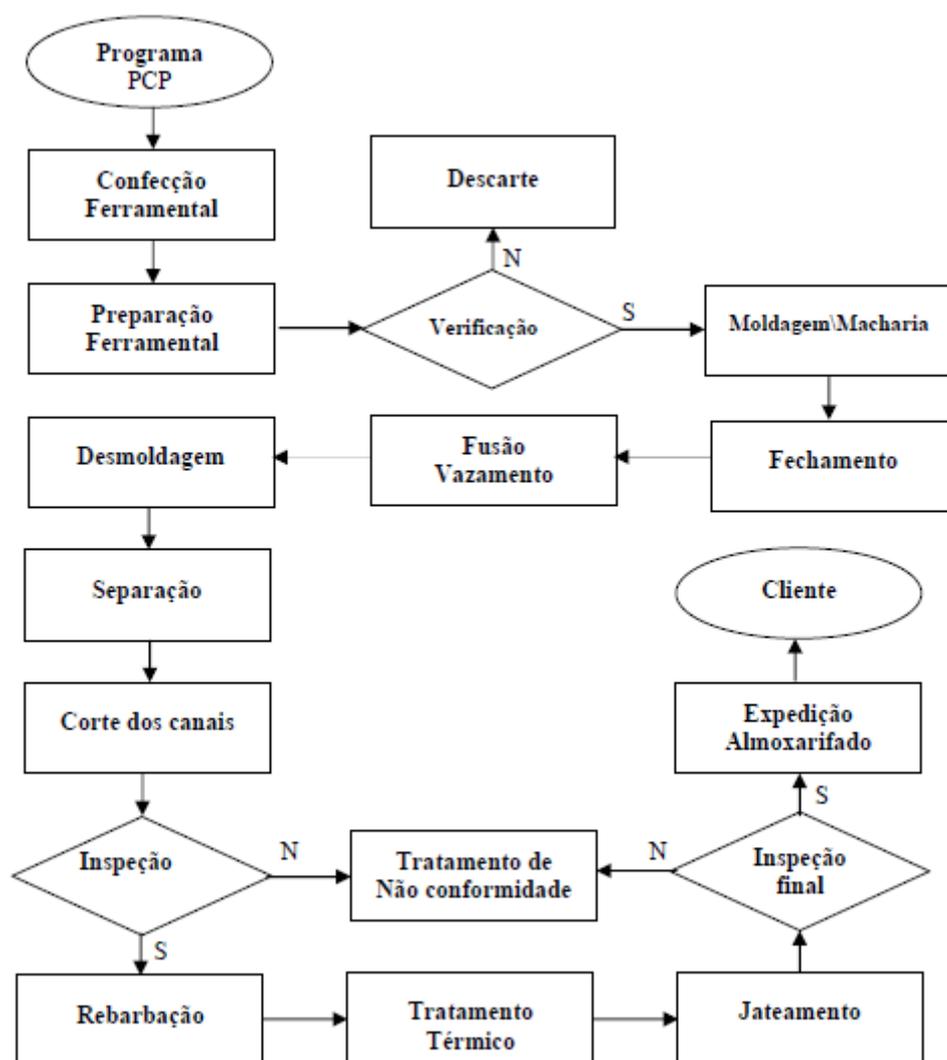
A indústria de fundição é conhecida por ser muito poluidora pelo fato de muitas vezes ser confundida com a indústria siderúrgica, ou pelo fato de que em décadas anteriores os poluentes dos fornos de fusão eram despejados na atmosfera. Hoje, seu maior problema é a grande geração de resíduos sólidos, principalmente a areia utilizada nos moldes de peças, que representa cerca de 86% dos resíduos sólidos gerados. (ALVES, 2012)

Um fato positivo que está a favor da indústria de fundição é a utilização de vários rejeitos metálicos como matéria prima, como sucatas provenientes de estamparias, cutelarias, forjarias e da obsolescência de equipamentos. (ALVES, 2012)

Segundo Penkaitis (2012), o processo de fundição pode ser definido basicamente como a fusão de um certo metal, sendo os mais comuns o ferro, aços, cobre, alumínio, zinco e magnésio, que é vazado em um molde, que depois de ser resfriado se solidifica, tendo como produto final uma nova peça metálica.

Na figura 1 está apresentado um fluxograma detalhado do processo de fundição.

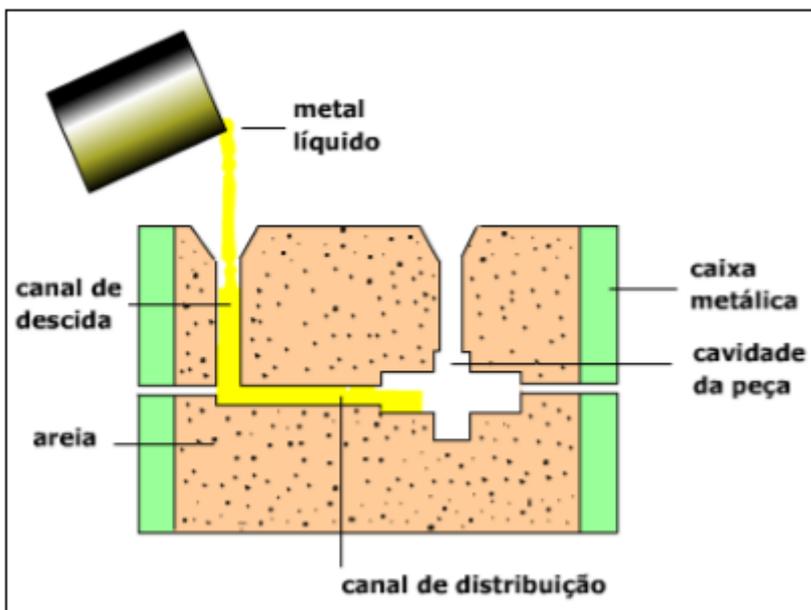
Figura 1 - Fluxograma do processo de fundição.



Fonte: Lopes (2009)

O molde é preparado previamente, existindo várias maneiras de prepará-lo, mas a mais utilizada é a de molde de aglomerado de areia, onde o aglomerado mais comum é a argila. A preparação do molde consiste em adicionar areia base e de retorno, argila e aditivos necessários a um misturador para posterior homogeneização. Esse material é colocado em caixas metálicas, juntamente com os “machos” que são feitos de materiais refratários e possuem o formato da peça que se deseja fundir. Após a confecção dos moldes, ocorre a fusão propriamente dita e o vazamento do metal líquido para dentro dos moldes, como pode ser visto na figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática da fundição em molde de areia.



Fonte: Centro de Informação Metal Mecânica (2010) apud Penkaitis (2012)

A parte final do processo consiste na desmoldagem da peça e posterior acabamento, onde as peças são passadas por um rebolo para retirar as rebarbas e sofrem um jateamento por granalhas para apresentarem uma estética melhor. Após esse processo a peça é pintada ou banhada em óleo para evitar corrosão. Alguma parte da areia utilizada pode ser reaproveitada, mas repetindo, se no processo começa a haver acúmulo de materiais residuais, como restos de resinas curadas ou de argilas, carvões e outros aditivos termicamente degradados no processo de vazamento, essa areia é substituída por areia nova para não comprometer a qualidade das peças, formando assim o principal resíduo da indústria de fundição.

2.2 AREIA DE FUNDIÇÃO

A areia de fundição pode ser definida como um insumo, constituído de areia-base, aglomerante ou ligante químico e agente de cura, utilizado para a fabricação dos moldes. De acordo com Lopes (2009), o principal objetivo da mistura da areia com a resina e os demais componentes é reproduzir as geometrias e dimensões do ferramental (modelo e caixa de macho), considerando suas respectivas contrações, e

obter a resistência mecânica necessária para suportar os esforços do metal líquido no momento do vazamento e durante a solidificação da peça. Devido ao seu custo e às suas características, a areia-base mais utilizada nesse processo é a sílica, que deve possuir no mínimo 99% de SiO_2 . Para a obtenção de um produto de qualidade algumas características têm grande importância no processo de preparação da areia, como impurezas, temperatura/umidade, potencial de hidrogênio (pH), forma do grão, granulometria e teor de finos. (LOPES, 2009)

A areia é utilizada pela indústria para a criação de moldes e núcleos de metal e o seu principal componente é um agregado fino, mineralogicamente puro. Essa areia é denominada de “areia base” e junto a ela são misturados ligantes com a finalidade de garantir a manutenção da forma dos machos e das cavidades internas dos moldes durante o processo de fundição. As areias utilizadas podem ser divididas em duas categorias: areia verde e areia ligada quimicamente. (OLIVEIRA, 2016)

A areia verde de fundição utilizada como molde para a fabricação de peças novas é uma composição de areia de sílica de alta qualidade, pó de carvão, bentonita e água. Essa areia tem suas propriedades alteradas quando existe a necessidade de se fundir peças acima da temperatura de $1400\text{ }^\circ\text{C}$, pois a sílica presente no material tem seu ponto de fusão em torno de $1728\text{ }^\circ\text{C}$ e se transforma em sílica vítrea após o resfriamento. Neste caso, a sílica pode ser substituída por cromita ou zirconita que se fundem a partir de $2180\text{ }^\circ\text{C}$ e $2550\text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. (MELLO, 2004)

A areia verde é muito reutilizada na própria fundição devido a sua alta qualidade, principalmente no que diz respeito a distribuição granulométrica e por manter as suas propriedades como adesão, coesão e refratariedade. Mantém também características uniformes da mistura, como a manutenção da proporcionalidade entre a areia, o pó de carvão e a bentonita. (MELLO, 2004)

Outras características importantes que a areia verde possui devido a mistura de seus componentes é a maleabilidade, compatibilidade, resistência a esforços mecânicos como compressão e tração, expansividade volumétrica, permeabilidade e perfeita desmoldagem. (MELLO, 2004)

Nas areias ligadas quimicamente, são adicionados ligantes químicos, tais como resinas fenólicas e ureia-formaldeído. É necessária a utilização destes aditivos químicos para a confecção de moldes e machos na produção de peças mais complexas ou que necessitam de melhor acabamento e resistência. (OLIVEIRA, 2016)

2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

Segundo a ABNT NBR 10.004/2004 resíduos sólidos são definidos da seguinte maneira:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT NBR 10.004/2004, p.1)

O setor de fundição, apesar de consumir sucatas metálicas como matéria-prima, gera grandes volumes de resíduos sólidos, entre os quais escórias, areia de moldagem e poeiras diversas. Sendo assim, é necessário caracterizar e quantificar quais são os resíduos industriais perigosos, não perigosos e inertes gerados, além disso, é sempre importante definir as etapas de manuseio, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização e disposição final.

A norma que classifica os resíduos sólidos no Brasil de acordo com sua periculosidade é a NBR ABNT 10004/2004, que os divide em quatro classes:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos: são resíduos que em função de suas propriedades físico-químicas e infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente. São considerados perigosos os que apresentam ao menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Os resíduos que recebem esta classificação requerem cuidados especiais de destinação.
- b) Resíduos Classe II – Não Perigosos: não apresentam nenhuma das características acima, podem ainda ser classificados em dois subtipos:
Classe II A – Não Inertes: são aqueles que não se enquadram no item anterior, Classe I, nem no próximo item, Classe II B. Geralmente apresenta

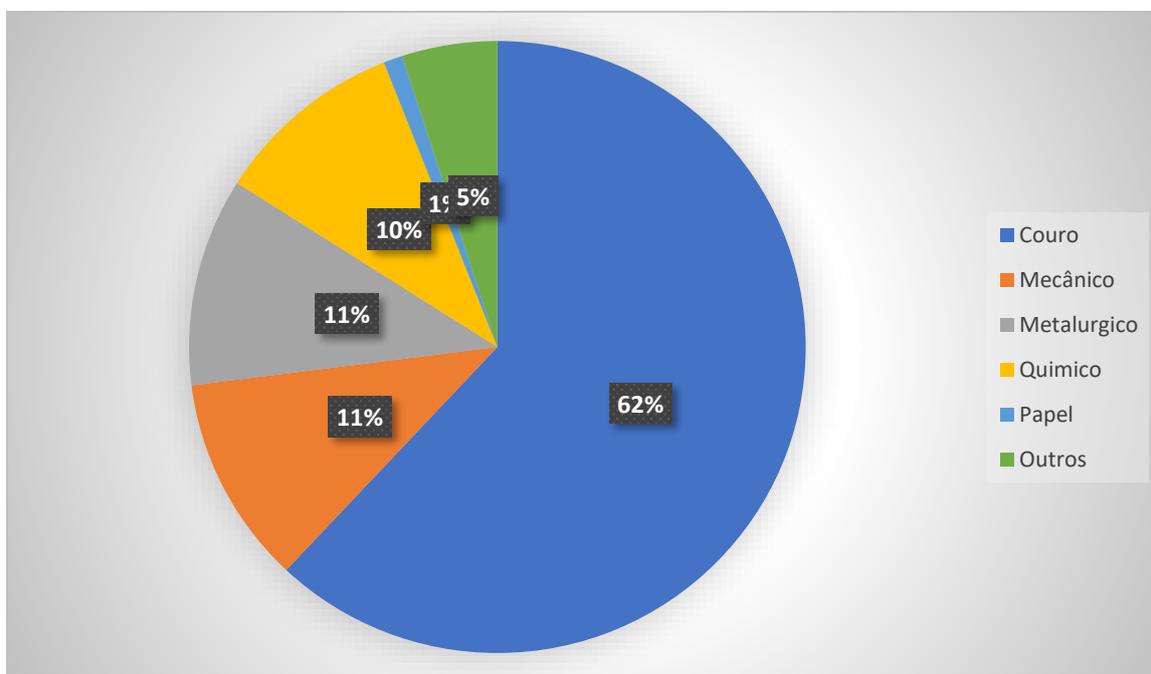
alguma dessas características: biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.

Classe II B – Inertes: quaisquer resíduos que submetidos a um contato estático ou dinâmico com água, não tenham nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de portabilidade de água, com exceção da cor, turbidez, dureza e sabor.

Um estudo realizado pelo órgão ambiental do Rio Grande do Sul (FEPAM) em 2003 mostrou que a maior quantidade de resíduos industriais produzidos no estado, 92%, são de Classe II, ou seja, não perigosos. Entretanto causam muitos problemas justamente pela quantidade produzida.

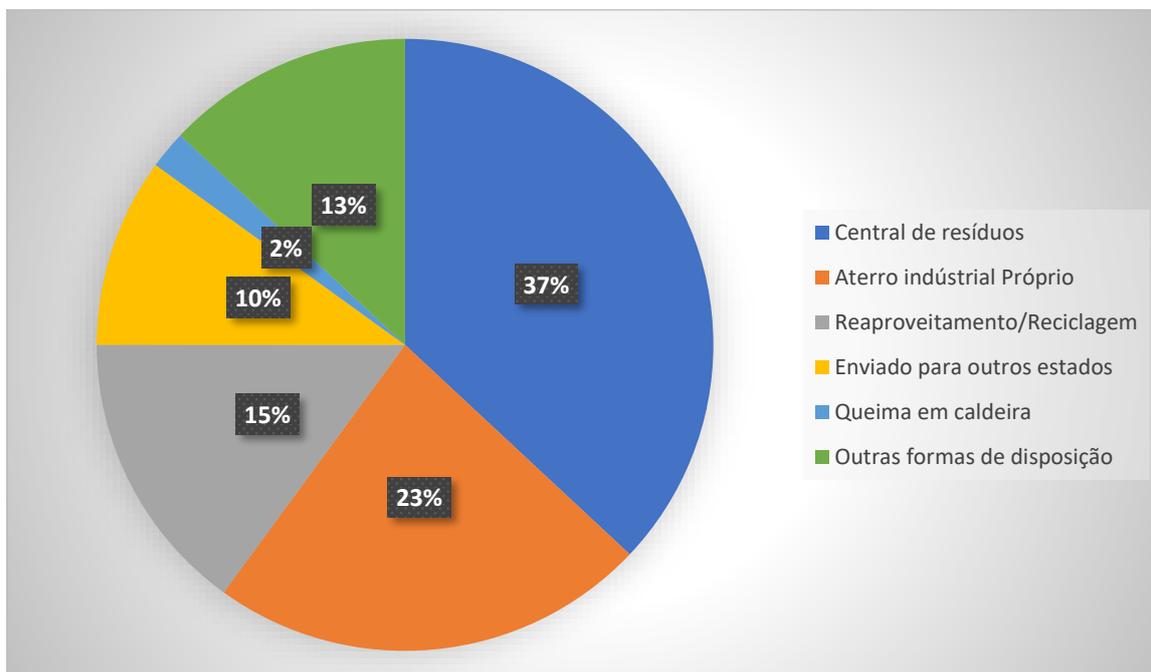
Nas figuras 3 e 4 podemos verificar a porcentagem de resíduo produzida por cada setor industrial e o destino final mais comum destes resíduos no estado do Rio Grande do Sul, com destaque para o setor de curtume que representava em 2003, 62% dos resíduos perigosos gerados.

Figura 3 - Geração de Resíduo Sólido Industrial Classe I por setor industrial.



Fonte: Adaptado de FEPAM, 2003

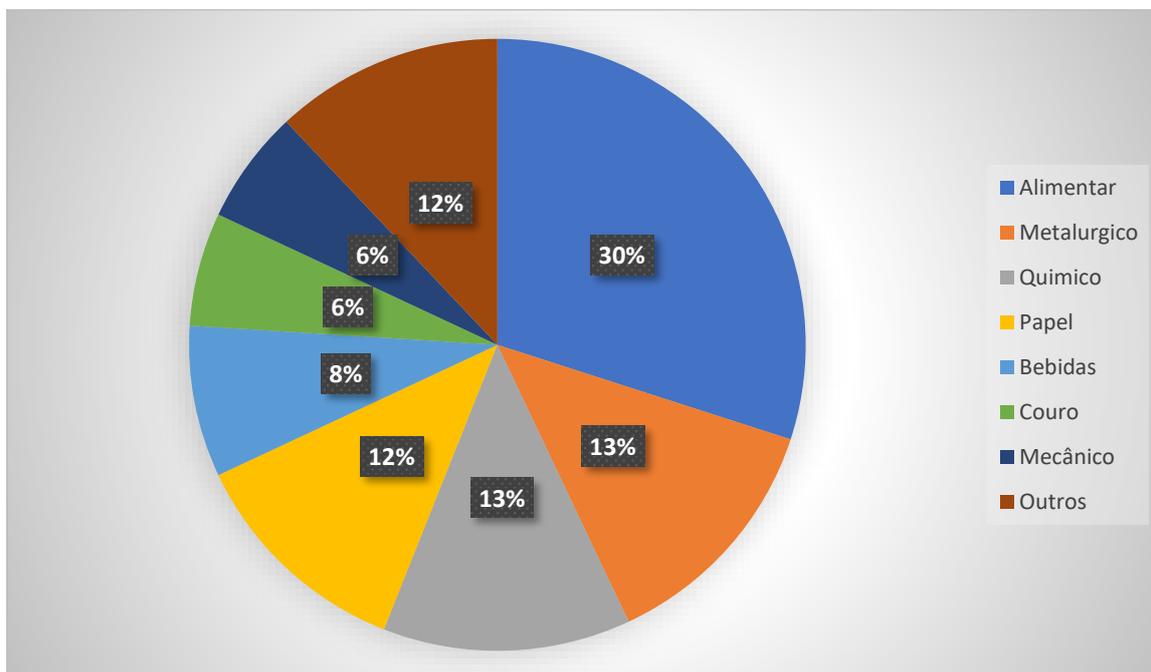
Figura 4- Destinação dos Resíduos Sólidos Industriais Classe I.



Fonte: Adaptado de FEPAM, 2003

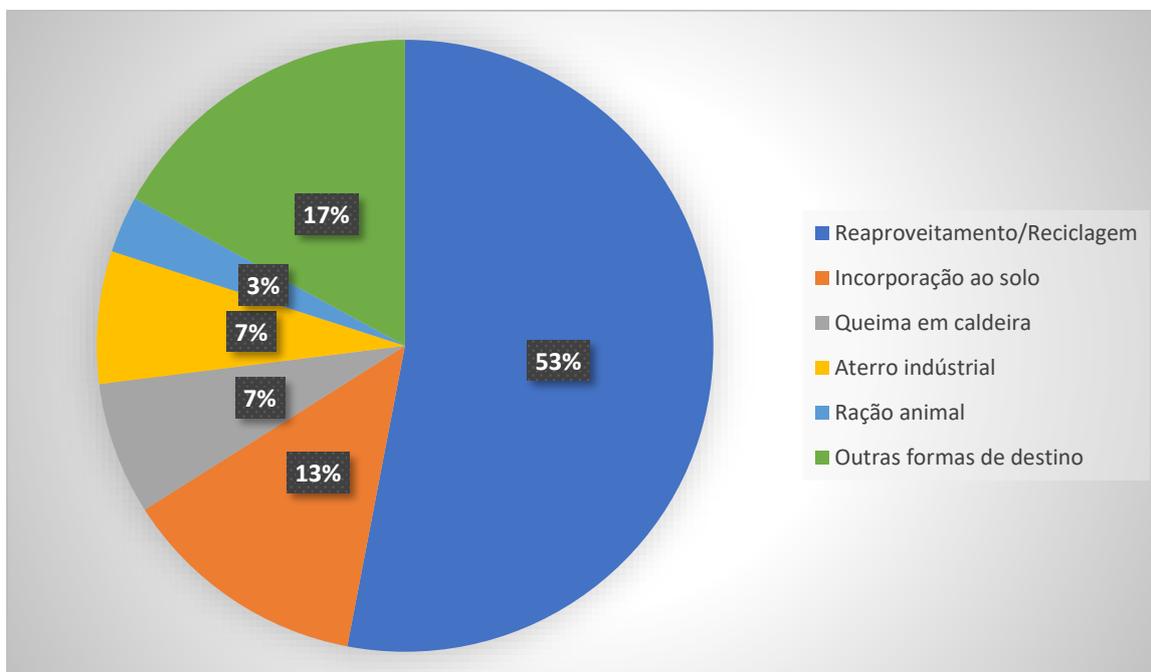
Em relação aos resíduos não perigosos, podemos observar na figura 5 que o setor metalúrgico é um dos grandes responsáveis pela geração, contribuindo com 13%. Já a figura 6 mostra que o reaproveitamento e a reciclagem é apenas 53% do destino mais comum dos resíduos não perigosos gerados.

Figura 5 - Geração de Resíduo Sólido Industrial Classe II por setor industrial.



Fonte: Adaptado de FEPAM, 2003

Figura 6 - Destinação dos Resíduos Sólidos Industriais Classe II.



Fonte: Adaptado de FEPAM, 2003

A disposição dos resíduos de areias de fundição em aterros industriais, quando não monitorado, torna-se perigoso para a população e gera um sério problema ambiental, devido ao volume produzido, além disso, acarreta um problema adicional, pois os órgãos e regulamentos ambientais levam as empresas a destinar seus resíduos em aterros cada vez mais distantes do local gerado, aumentando consideravelmente os custos envolvidos, além da empresa se preocupar cada vez mais com o cuidado de gerenciamento, tratamento, manutenção e destinação final dos resíduos ao aterro, se torna uma responsabilidade à empresa por toda a sua trajetória de vida. (LOPES, 2009)

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ADF SEGUNDO AS LEGISLAÇÕES

A prática de reutilização de ADF ainda não é muito utilizada no Brasil, talvez por não haver uma legislação específica que regulamente em quais atividades essa areia pode ser reutilizada. Apenas existem regulamentações para o reuso em asfalto e agregado de concreto não estrutural. O ideal seria a elaboração de um estudo para saber o real risco que essa atividade poderia causar ao meio ambiente, regulamentando, ou não, sua utilização para determinadas áreas, fazendo com que o mercado fique livre para se estabelecer. (ALVES, 2012)

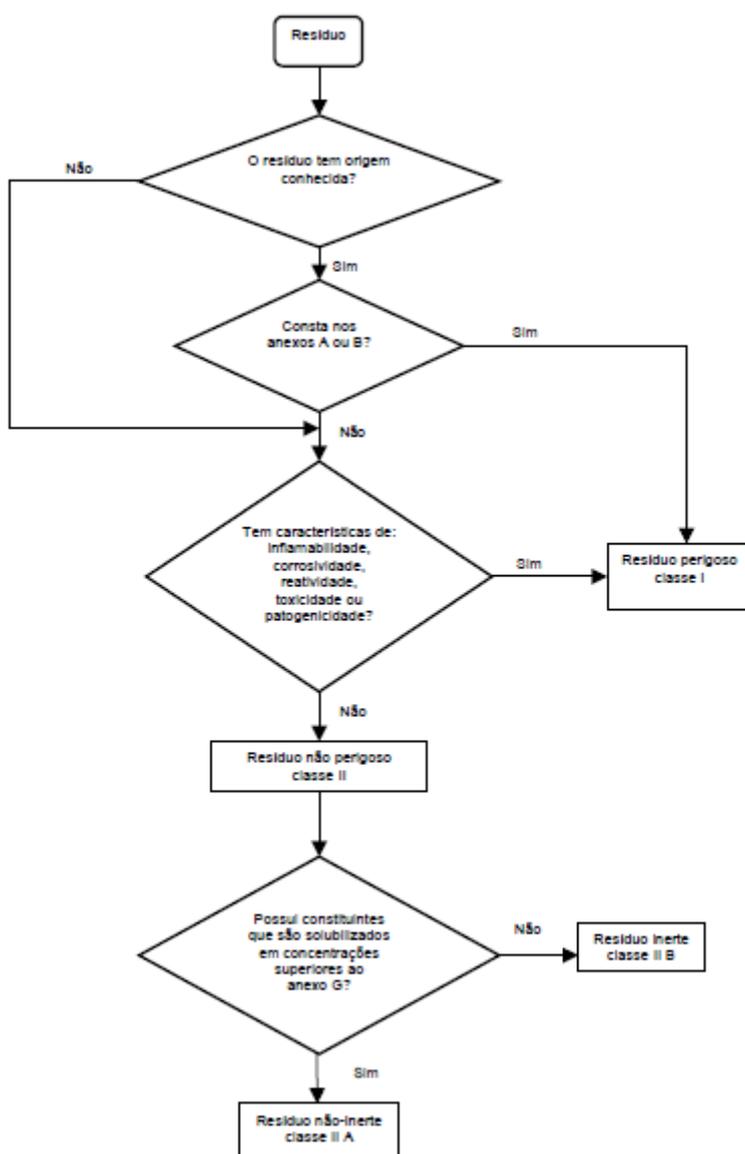
No Brasil, as legislações em relação aos resíduos de ADF estão baseadas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), implementada pela Lei nº 12305/2010. (BRASIL, 2010a). Também podemos citar como legislações importantes:

- Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente nº 307 a qual estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil; (BRASIL, 2002)
- NBR 10.004 que é responsável pela classificação dos resíduos sólidos; (ABNT, 2004);
- NBR 10.005 relativa à lixiviação dos resíduos; (ABNT, 2004)
- NBR 10.006 que estabelece métodos de solubilização de Resíduos Sólidos; (ABNT, 2004c)

Em relação às legislações específicas destaca-se a norma NBR 15.702/2009 que dá diretrizes para a aplicação das ADF em concreto asfáltico e em cobertura diária em aterro sanitário. (ABNT, 2009a).

Em geral, as areias de fundição são enquadradas como resíduos não perigosos CLASSE II A – NÃO INERTE pela literatura, como em estudos apresentados por RIBAS (2016) e LIMA (2014). Podemos ainda realizar sua classificação de acordo com a Figura 1 da NBR ABNT 10.004/2004, adaptada na Figura 7, que classifica os resíduos de acordo com suas principais características.

Figura 7 - Caracterização e classificação de resíduos.



2.5 PROBLEMATICA DO DESCARTE DA ADF

A geração de resíduos sólidos é o grande problema do setor industrial. Qualquer empresa gera resíduos, sendo em pequena, média ou grande escala. As indústrias de fundição, por exemplo, geram anualmente, segundo a ABIFA (2014), cerca de 3 milhões de toneladas de resíduo de ADF por ano, sendo que seu descarte gera um grande custo para a empresa além da questão legal e ambiental.

A expressiva geração, e a falta de legislações que regularizam a reutilização da ADF em outras atividades faz com que se tenha um grande acúmulo desse resíduo em aterros sanitários ou até em locais não licenciados pelo órgão ambiental. (OLIVEIRA, 2016). Um levantamento feito pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM) em 2008 trouxe dados referentes a disposição das ADF no estado do Rio Grande do Sul, e verificou-se que 81% das empresas contatadas dispõem seu resíduo em aterros sanitários licenciados. Ainda segundo Oliveira (2016), a prática de apenas dispor o resíduo de ADF se explica pelo fato de o Brasil possuir uma abundante matéria prima, tornando-a barata, e pelo fato de a disposição ser uma alternativa aceita legalmente.

Marioto (2001) apud Penkaitis (2012) afirma que se não fosse a presença de alguns contaminantes, as ADF poderiam ser consideradas inertes, Classe IIB, segundo a NBR 10.004/2004, entretanto a maioria se classifica como não inerte, Classe II A. Pequenas quantidades de areia são consideradas resíduos perigosos, Classe I, devido à grande presença de torrões, que se formam devido as altas temperaturas que a areia é submetida dentro dos moldes, e esses torrões tem concentrações de fenóis superiores aos limites estabelecidos na norma.

A disposição inadequada destes resíduos afeta principalmente o solo, as águas superficiais e subterrâneas devido ao lixiviamento de poluentes, o que acarreta em quantidades superiores destes poluentes na água e no solo do que está permitido na legislação. (PENKAITIS, 2012)

2.6 ESTUDOS SOBRE A REUTILIZAÇÃO DA ADF

Atualmente está havendo uma intensificação dos estudos para encontrar alternativas para a reutilização da ADF, pelo fato de ser o maior resíduo das indústrias de fundição e gerar grandes despesas.

Segundo Santos (2003), um dos primeiros passos para o reaproveitamento de areia de fundição foi dado em 2003 quando André Luís Bonin orientado pelo professor Adilson J. Rossini, identificou uma alternativa para a reutilização da areia preta de fundição na construção civil em abril daquele ano, o projeto ganhou força ao proporcionar a construção de uma fábrica de tijolos ecossocial na entidade Comunidade Terapêutica Mais Vida de Limeira-SP.

Quissini (2009) caracterizou 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.

Bonet (2002) analisou a viabilidade técnica do reaproveitamento dos resíduos areia de fundição, nas massas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQs) e concluiu que é uma proposta viável, técnica e ambientalmente, a incorporação dos resíduos de areia de fundição nos CBUQs, como uma forma de proteção ao meio ambiente.

Outro caso onde foi comprovada a possibilidade de reutilização das ADFs é lembrado por RIBAS (2016) que traz o exemplo um projeto desenvolvido por alunos da Universidade de Caxias do Sul (UCS), com o apoio de indústrias caxienses, que já estão licenciadas para utilizar as ADFs como matéria-prima na construção de blocos de concreto. Foi constatado no estudo que esse resíduo substitui a areia quartzosa, conhecida como areia natural. O objetivo era verificar se o material teria a resistência exigida pela Associação de Normas Técnicas (ABNT) e ficaria abaixo do limite de toxicidade permitido pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONSEMA), o que foi comprovado na pesquisa.

Na literatura, encontra-se também um estudo elaborado por KLINSKY (2008). O pesquisador avaliou a possibilidade de reutilizar o resíduo de ADF como base e sub-base de pavimentos de baixo volume de tráfego, através de sua incorporação a solos argilosos. O estudo concluiu que teores de areia de 40 a 60% poderiam ser

incorporados a solos lateríticos argilosos para obter materiais com comportamento semelhante ao do Solo Arenoso Fino Laterítico, que é o material ideal para ser utilizado em bases e sub-bases de pavimentos de baixo custo.

É inevitável que as empresas busquem cada vez mais alternativas para reaproveitarem seus resíduos, tendo em vista que as legislações ficam cada vez mais rigorosas e os custos de produção também aumentam pelo fato de as empresas de fundição dependerem de um recurso natural, como a areia.

2.7 SOLOS

A ABNT NBR 6502/1995 define solo como “Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica”, ou simplesmente, produto da decomposição e desintegração da rocha pela ação de agentes atmosféricos.

O conceito de solo adquire outros significados de acordo com a finalidade de uso. Na Agricultura é a camada de terra tratável, geralmente de poucos metros de espessura, que suporta as raízes das plantas. Já para a Geologia o solo é um produto do intemperismo físico e químico das rochas, situado na parte superficial do manto de intemperismo. Constitui-se de material rochoso decomposto. E por fim na Engenharia Civil, o solo é todo o material da crosta terrestre que não oferece resistência intransponível à escavação mecânica e que perde totalmente toda resistência, quando em contato prolongado com a água.

O solo possui várias propriedades e uma das primeiras que deve ser observada é a sua granulometria. Os ensaios de granulometria podem ser realizados de acordo com procedimentos descritos na norma NBR 7181/1984 e classificados de acordo com a NBR 6502/1995, como podemos verificar a seguir:

- Argila: Solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade.
- Silte: Solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco o ar. Suas propriedades dominantes são devidas à

parte constituída pela fração silte. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm.

- Areia fina: Areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 0,20 mm.

- Areia média: Areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,20 mm e 0,60 mm.

- Areia grossa: Areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,60 mm e 2,0 mm.

- Pedregulho fino: Pedregulho com grãos compreendidos entre 2,0 mm e 6,0 mm.

- Pedregulho médio: Pedregulho com grãos compreendidos entre 6,0 mm e 20,0 mm.

- Pedregulho grosso: Pedregulho com grãos compreendidos entre 20,0 mm e 60,0 mm.

Para a realização do ensaio granulométrico são utilizadas peneiras com específicos diâmetros de abertura, como podemos observar na tabela 1.

Tabela 1 – Abertura das peneiras utilizadas na análise granulométrica de acordo com a NBR 7181/1984

Peneira (nº)	Diâmetro de abertura (mm)
1"	25,4
3/4"	19,1
1/2"	12,7
3/8"	9,5
4	4,76
8	2,38
10	2,00
30	0,59
40	0,42
50	0,30
100	0,15
200	0,07

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.7.1 Tipos de solo

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (2006), os solos são divididos em treze classes consideradas de 1ª ordem, que estão apresentados na 8.

Figura 8 – Classes de solo.

Classe	Elemento Formativo	Termos de conotação e de memorização
ARGISSOLO	ARGI	"Argilla". Acumulação de argila Tb ou Ta (baixa ou alta atividade da fração argila), dessaturado de bases.
CAMBISSOLO	CAMBI	"Cambiare", trocar ou mudar. Horizonte B incipiente.
CHERNOSSOLO	CHERNO	Preto, rico em matéria orgânica.
ESPODOSSOLO	ESPODO	"Spodos", cinza vegetal. Horizonte B espódico.
GLEISSOLO	GLEI	Glei. Horizonte glei.
LATOSSOLO	LATO	"Lat", material muito alterado. Horizonte B latossólico.
LUVISSOLO	LUVI	"Luere", iluvial. Acumulação de argila com alta saturação por bases e Ta.
NEOSSOLO	NEO	Novo. Pouco desenvolvimento genético.
NITOSSOLO	NITO	"Nitidus", brilhante. Horizonte B nítico.
ORGANOSSOLO	ORGANO	Orgânico. Horizonte H ou O hístico.
PLANOSSOLO	PLANO	"Planus". Horizonte B plânico.
PLINTOSSOLO	PLINTO	"Plinthus". Horizonte plíntico.
VERTISSOLO	VERTI	"Vertere", inverter. Horizonte vértico.

Fonte: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2006).

Como o solo utilizado no trabalho é enquadrado na classe Latossolo, apenas este será conceituado, como segue no item a seguir.

2.7.2 Latossolos

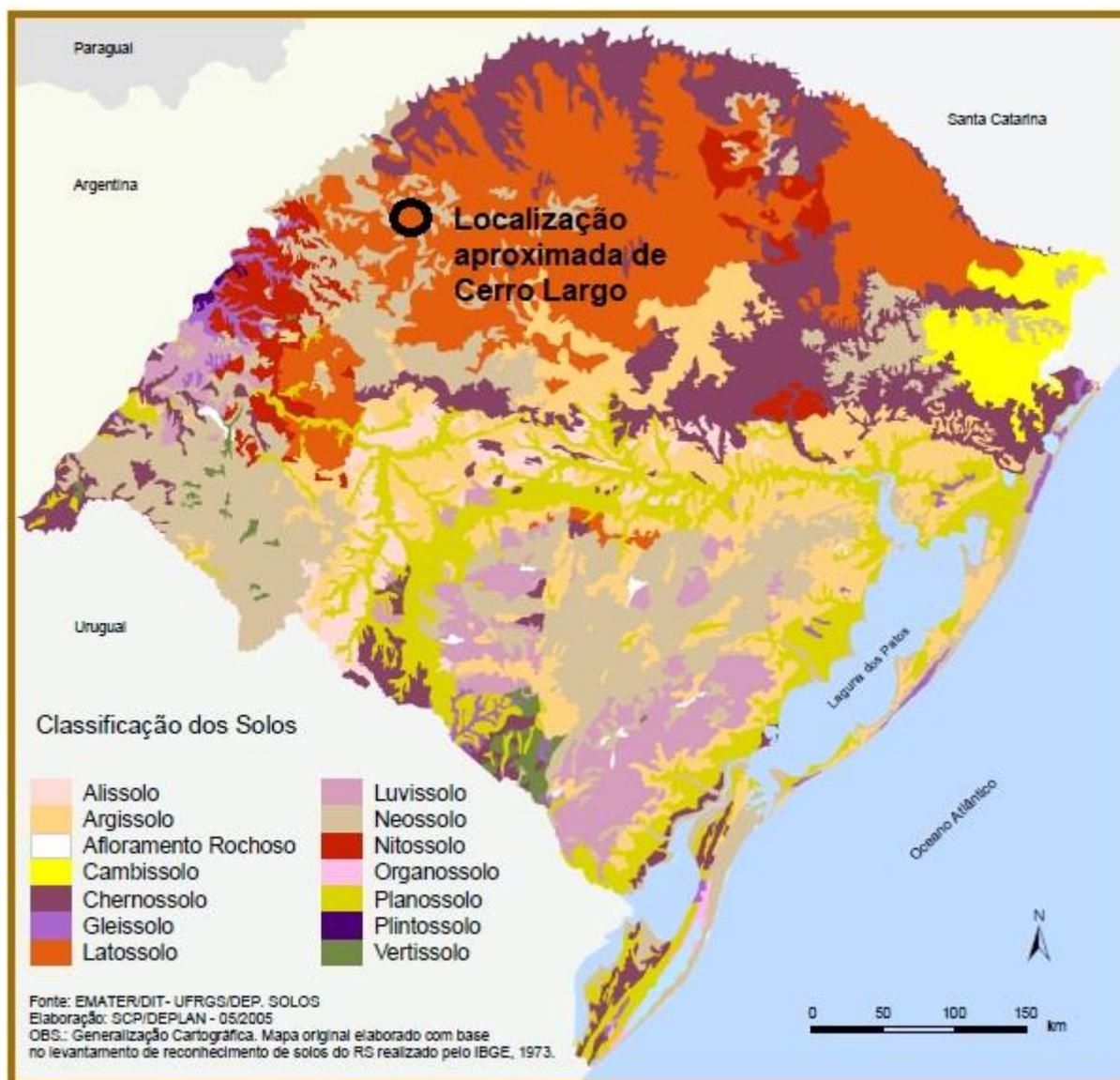
Segundo a Embrapa, os Latossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura.

O conceito inicial de Latossolo, segundo KELLLOG (1949) apud KER (1997), contemplava solos cujas características encontravam-se fortemente relacionadas à intemperização e lixiviação intensas e responsáveis pelas baixas atividade das argilas; capacidade de troca de cátions; relações moleculares sílica/ alumínio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Ki}$) e sílica/óxidos de ferro e alumínio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Kr}$). Além disso, os solos designados por Latossolos, além de profundos, de coloração relativamente homogênea com matizes avermelhadas e/ou amareladas, apresentariam distribuição mais ou menos uniforme de argila ao longo do perfil, elevada estabilidade de agregados e baixo conteúdo de silte em relação à argila. O termo deveria ser empregado independente da presença ou não de laterita, na sua concepção original.

O solo mais comum na Região das Missões no Rio Grande do Sul, onde se enquadra Cerro Largo, município de onde foi retirado o solo para o presente trabalho, é o Latossolo Roxo que se refere a solos minerais, profundos, bem acentuadamente drenados de coloração vermelho arroxeada cuja distribuição geográfica encontra-se associada à presença de rochas efusivas básicas, metabasitos e tufitos em expressivas áreas do Rio Grande do Sul. Os Latossolos Roxos são, em sua grande maioria, de textura argilosa ou muito argilosa, condição esta ditada pela própria pobreza em quartzo do material de origem. (KER, 1997)

A seguir, na figura 9, está representado o mapa de solos do estado do Rio Grande do Sul elaborado com base no levantamento de reconhecimento de solos do estado realizado pelo IBGE em 1973 e reeditado pela EMATER (2005).

Figura 9 – Mapa de solos do Rio Grande do Sul.



Fonte: EMATER, 2005.

DE OLIVEIRA (2008) realizou um estudo para determinar a favorabilidade de áreas para implantação de aterros controlados. Os Latossolos foram escolhidos como de máxima adequabilidade para a construção de aterros por serem solos minerais, logo, mais estáveis do ponto de vista da diminuição do volume, não hidromórficos, com horizonte Bw que possui zona de aeração e textura média, além de ter elevada permeabilidade, sendo, assim, bem acentuadamente drenados.

2.7.3 Solos compactados

A compactação consiste em um processo mecânico que, através de uma aplicação repetida e rápida de cargas aplicadas no solo, conduz a uma diminuição do seu volume e, portanto, a uma diminuição do índice de vazios e a um aumento do peso seco. Esta redução de volume é resultado, sobretudo, da expulsão de ar dos vazios do solo, não ocorrendo significativa alteração do teor de umidade nem alteração do volume das partículas sólidas durante a compactação. A prática de compactar o solo é muito comum em construção de vias de tráfego, fundamentos de prédios e residências para aumentar a resistência do solo que deverá suportar altas cargas, como podemos observar nas figuras 10 e 11.

Figura 10 – Compactação de solo em vias.



Fonte: Brasil ferroviário, 2018.

Figura 11 – Fundação de residência.



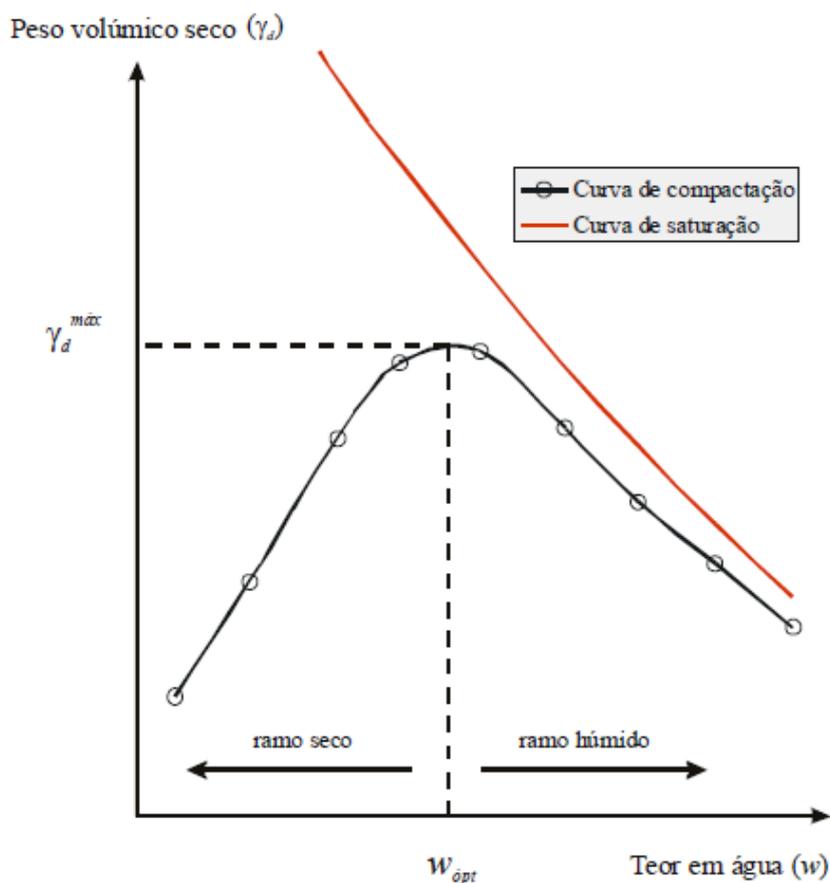
Fonte: JSA Empreiteira, [2018?]

Por outro lado, a compactação provoca um aumento do grau de saturação visto que o volume de vazios sofre uma diminuição devido a expulsão de grande parte do ar que está entre as partículas de solo. Com este processo a área de contato das partículas sólidas aumenta, aumentando assim a resistência do solo e diminuindo a sua deformação. Além disso, o solo ficando num estado mais denso dificultará a passagem da água, ou seja, torna-se menos permeável.

O processo de compactação do solo depende principalmente de dois fatores: a energia aplicada e o teor de umidade do material. Toma-se como exemplo então um procedimento de compactação com uma determinada energia em que o solo é compactado misturando-lhe diferentes quantidades de água (obtendo-se, portanto, diferentes teores em água) e medindo-se o resultado da compactação através da determinação do peso específico do material. O resultado pode assim ser descrito por pares de valores (ω, γ_d) onde ω é a umidade do material e γ_d é o peso específico, que quando representados num gráfico, dão origem à curva de compactação como se ilustra na figura 12.

Descobre-se assim o ponto ótimo de umidade e de peso específico. O ponto máximo divide a curva, sendo que a parte da esquerda é considerada como ramo seco e a parte da direita como ramo úmido.

Figura 12 – Exemplo de curva de compactação.



Fonte: Santos (2008).

De uma forma bastante simplificada, para explicar este comportamento, pode-se afirmar que uma massa de solo que possua pouca água apresenta-se aglomerada em torrões de solo. A ação de compactação irá desfazer esses torrões, permitindo a expulsão do ar, no entanto, os torrões são duros e se o solo possuísse um pouco mais de água, a ação de compactação seria facilitada e, por conseguinte, mais eficaz. Por esta razão, do lado seco, o aumento do teor em água conduz ao aumento do peso específico seco.

Porém, se a quantidade de água ultrapassar o ponto ótimo, verifica-se que deixa de haver contato de determinadas zonas do ar do solo com a atmosfera, ficando aprisionado entre o solo e a água intersticial, não podendo ser expulso. A partir deste ponto, o aumento do teor em água não irá permitir que a compactação se realize de forma tão eficaz. Por este motivo, do lado úmido, o aumento do teor de água conduz à diminuição do peso específico seco. (SANTOS, 2008)

Desta forma podemos afirmar que a escolha do ponto ideal deve ser sempre próxima ao ponto de umidade e peso específico ótimos, diferenciando o lado seco e o lado úmido de acordo com o tipo de obra de aterro a ser realizada.

3 MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e a metodologia utilizada para a realização dos ensaios necessários para verificar se a ADF misturada ao solo pode ser utilizada como material de base para aterros compactados. A metodologia adotada, é fundamentada por procedimentos e normas técnicas, visando caracterizar fisicamente a areia verde de fundição e o solo, bem como a mistura dos dois materiais. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFFS.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

O solo utilizado é um solo argiloso que foi retirado do campus da UFFS – Cerro Largo – RS como podemos observar na figura 13. O solo foi destorado com auxílio de um almofariz com pistilo (Fig.14), para facilitar a homogeneização com a areia de fundição.

Figura 13 - Solo utilizado nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 – Almofariz e pistilo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O ponto de coleta do solo utilizado para a realização dos ensaios está indicado na figura 15 e foi escolhido porque neste local há um talude que facilita a retirada das amostras deformadas do solo do horizonte B, numa profundidade de 1,0 m aproximadamente. As coordenadas geográficas do ponto são $28^{\circ} 8' 25,86''$ S $54^{\circ} 45' 18,12''$ W.

Figura 15 – Ponto de coleta do solo



Fonte: Google Earth (2017)

3.1.2 Areia de fundição

A ADF utilizada foi obtida da empresa de fundição A. J. Borghetti Fundição e Usinagem, situada em Cerro Largo – RS. O tipo de areia residual gerada é a areia de fundição verde proveniente do jateamento das peças depois de fundidas, como o da figura 16. Esse material estava pronto para os ensaios pois possuía baixa umidade e granulometria adequada para ser homogeneizada junto ao solo.

Figura 16 – Areia de fundição utilizada nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.3 Água destilada

Para o preparo das amostras e realização dos ensaios, utilizou-se água destilada preparada no próprio laboratório, pois, a água destilada propicia uma maior segurança devido ao seu grau de pureza mais elevado em relação a água comum de abastecimento público.

3.2 MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, foram selecionadas quatro porcentagens diferentes de mistura dos materiais como está descrito na tabela 2.

Tabela 2 – Composição da amostra de solo e areia de fundição

Material	Porcentagem de material utilizado (%)			
Solo	100	65	50	35
Areia de fundição	0	35	50	65

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.1 Umidades

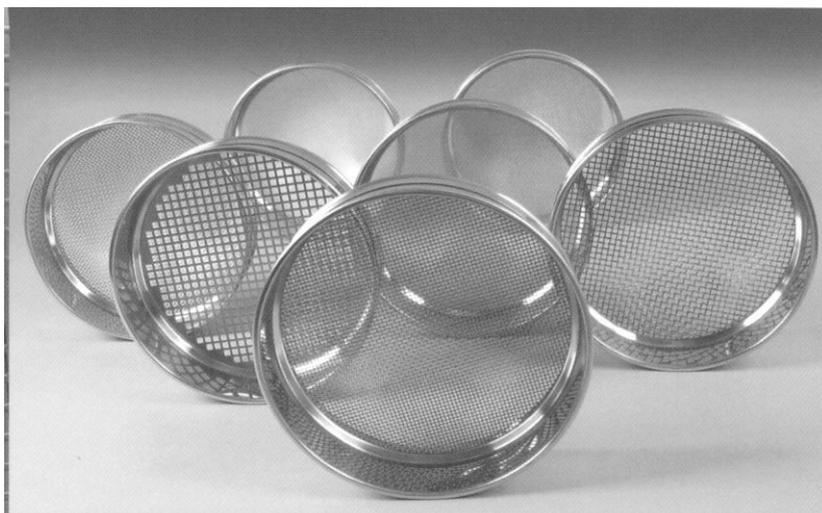
Todas as umidades obtidas para a realização dos ensaios foram realizadas de acordo com a NBR 6457/1986 que dispõe sobre a preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

3.2.2 Granulometria

Os ensaios de granulometria da ADF foram realizados de acordo com procedimentos descritos na norma NBR 7181/1984 e classificados de acordo com a NBR 6502/1995

O equipamento utilizado foram as peneiras (Fig. 17) de diversos diâmetros de abertura conforme apresentado na tabela 3.

Figura 17 – Peneiras usadas nos ensaios de granulometria



Fonte: Elaborada pelo autor.

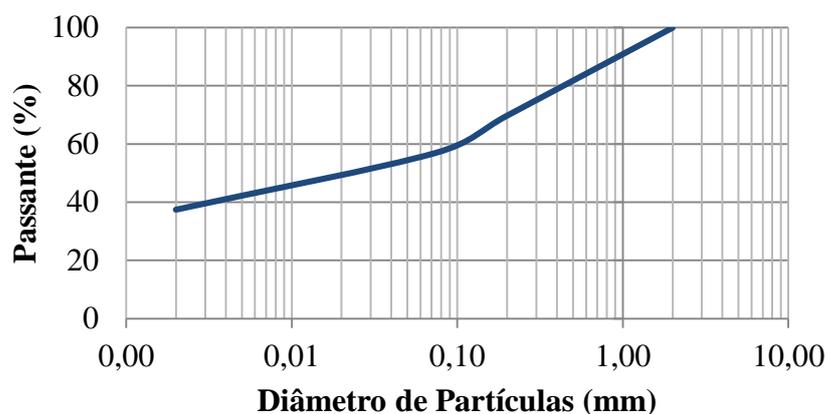
Tabela 3 – Abertura das peneiras utilizadas na análise granulométrica

Peneira (nº)	Diâmetro de abertura (mm)
1"	25,4
3/4"	19,1
1/2"	12,7
3/8"	9,5
4	4,76
8	2,38
10	2,00
30	0,59
40	0,42
50	0,30
100	0,15
200	0,07

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a granulometria do solo foram utilizados os resultados obtidos por PIVETTA (2017) que pelo ensaio granulométrico determinou um percentual de 25% de silte, 34% de argila e o restante sendo composto de areia, como pode ser observado na figura 18.

Figura 18 - Granulometria do solo da UFFS campus Cerro Largo –RS



Fonte: PIVETTA (2017)

3.2.3 Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg são divididos em:

- Limite de Liquidez: Os ensaios de limites de liquidez podem ser realizados de acordo com a NBR 6459/1984. O principal equipamento utilizado nestes testes é o Aparelho de Casagrande, como apresentado na figura 19. Essa Norma estabelece que os valores de LL são aqueles encontrados na umidade do solo para 25 golpes, de acordo com a equação da reta de cada Ponto

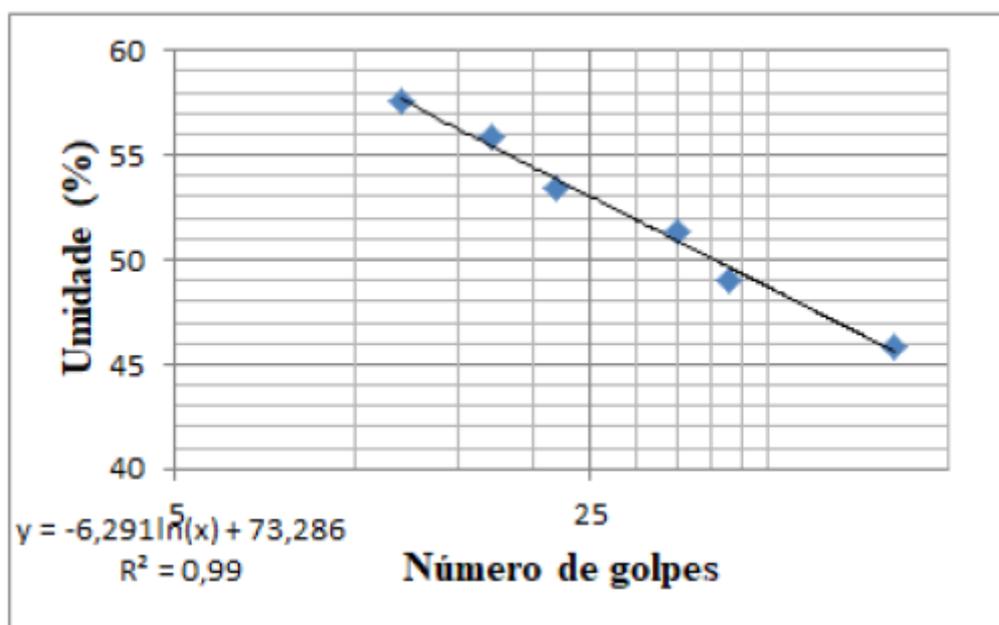
Figura 19 – Aparelho de Casagrande



Fonte: SoloCap (2018).

Ensaio realizado por Castro (2017) determinaram um limite de liquidez de 53,03 com uma umidade próxima de 50% em um ponto muito próximo de coleta ao deste estudo. O ajuste pode ser observado na figura 20.

Figura 20 – Limite de liquidez



Fonte: Castro (2017)

- Limite de Plasticidade: Os ensaios de limite de plasticidade são realizados com os procedimentos especificados na norma NBR 7180/1984. O limite de plasticidade é obtido através da umidade encontrada em cada ensaio realizado. O índice de plasticidade depende do limite de liquidez e é calculado de acordo com a equação:

$$IP = LL - LP$$

Equação (1)

Em que:

IP = Índice de plasticidade (%);

LL = Limite de Liquidez (%);

LP = Limite de plasticidade (%).

No estudo de Castro (2017) este solo onde foi coletada a amostra não apresentou plasticidade devido à quantidade elevada de areia presente na amostra.

3.2.4 Densidade real dos grãos

Os ensaios para a determinação da densidade real dos grãos da areia de fundição foram realizados em triplicata com 20g de areia por ensaio, de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa. A equação utilizada para o cálculo da densidade foi a seguinte:

$$Dp = \left(\frac{a}{50-b} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

Dp = Densidade das partículas (g.cm^{-3});

a = massa da amostra seca a 105°C (g);

b = volume de álcool gasto (cm^{-3}).

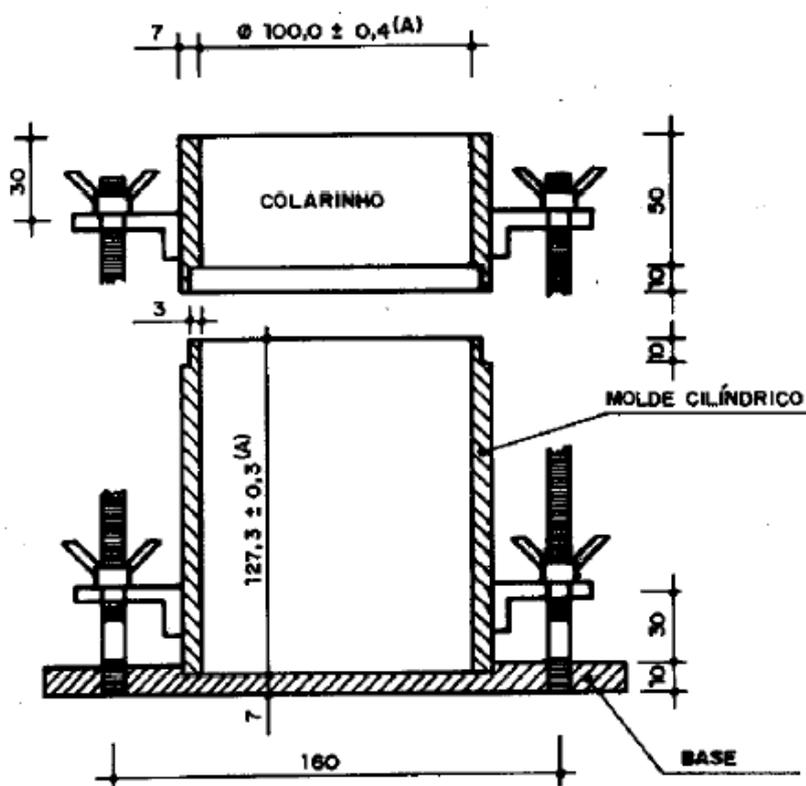
Os ensaios de densidade realizados por Castro (2017) no campus da UFFS – Cerro Largo – RS concluíram que a densidade real média dos grãos de solo é de $2,63 \text{ g.cm}^{-3}$.

3.2.5 Ensaios de compactação (proctor normal)

Os ensaios de compactação foram realizados com as porcentagens de solo e ADF indicadas anteriormente na tabela 2. Em cada ensaio, seis pontos de compactação foram analisados de acordo com a NBR 7182/1986 para a verificação do peso específico do material em diferentes umidades. A cada ponto, a umidade foi aumentada em aproximadamente 2% para atingir os valores ótimos de umidade e densidade aparente seca.

O cilindro utilizado foi o cilindro pequeno (proctor) que tem um peso de 2374,14 g e um volume de 997,46 cm³ e suas dimensões estão especificadas na figura 21. O solo é compactado com auxílio de um soquete, conforme apresentado na figura 22.

Figura 21 – Cilindro utilizado nos ensaios de compactação



Fonte: Adaptado da NBR 7182/1986.

Figura 22 - Ensaio de Proctor Normal



Fonte:

3.2.6 Ensaio de resistência à compressão simples

Nos ensaios de resistência à compressão simples, foram seguidos os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 12770/1992. Para cada porcentagem de mistura solo + ADF foram moldadas três amostras cilíndricas com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Após a moldagem, as amostras foram levadas para uma prensa hidráulica como a da figura 23 para a determinação da resistência à compressão até atingir a ruptura da amostra.

Figura 23 – Prensa hidráulica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

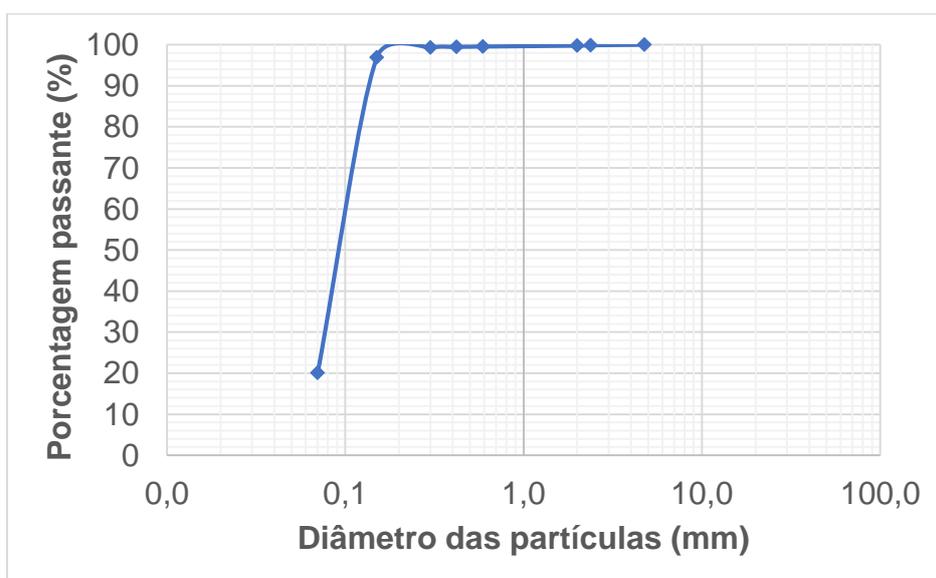
Com o propósito de atingir os objetivos deste trabalho foram realizados ensaios que caracterizaram fisicamente o material utilizado, bem como, testes de compactação e compressão simples. Os resultados obtidos estão apresentados por meio de tabelas e gráficos.

4.1 GRANULOMETRIA

4.1.1 Areia de fundição

A ADF possui uma composição mais homogênea em relação ao solo, o que pode ser visualizado na figura 24. Esse material é composto por 0,22% de pedregulho fino, 0,21% de areia grossa, 1,57% de areia média, 77,94% de areia fina e os 20,06% restantes são compostos por silte e argila.

Figura 24 – Curva Granulométrica da Areia de Fundição



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

4.2.2 Densidade real dos grãos de areia de fundição

A partir dos ensaios obteve-se os resultados apresentados na tabela 4 e podemos chegar à conclusão que a ADF possui grãos de material com uma densidade um pouco menor do que o solo natural, em média $2,45 \text{ g.cm}^{-3}$.

Tabela 4 – Densidade real dos grãos da Areia de Fundição

Ensaio	1	2	3
Peso da areia (g)	20,032	20,035	20,084
Peso do balão (g)	39,791	39,796	39,800
Peso do balão + areia (g)	59,821	59,829	59,882
Volume de álcool (ml)	41,800	41,900	41,800
Peso do balão + areia + álcool (g)	93,684	93,887	93,740
Volume do balão (cm^3)	50,000	50,000	50,000
Densidade (g.cm^{-3})	2,443	2,473	2,449
Densidade média (g.cm^{-3})		2,449	

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR NORMAL)

Após a realização dos ensaios, obteve-se os resultados da densidade do solo seco para umidades ótimas que estão apresentados na tabela 5 e figura 25, onde pode-se verificar que com o aumento da porcentagem de ADF adicionado junto ao solo, há uma redução da umidade ótima e um aumento na densidade aparente seca máxima.

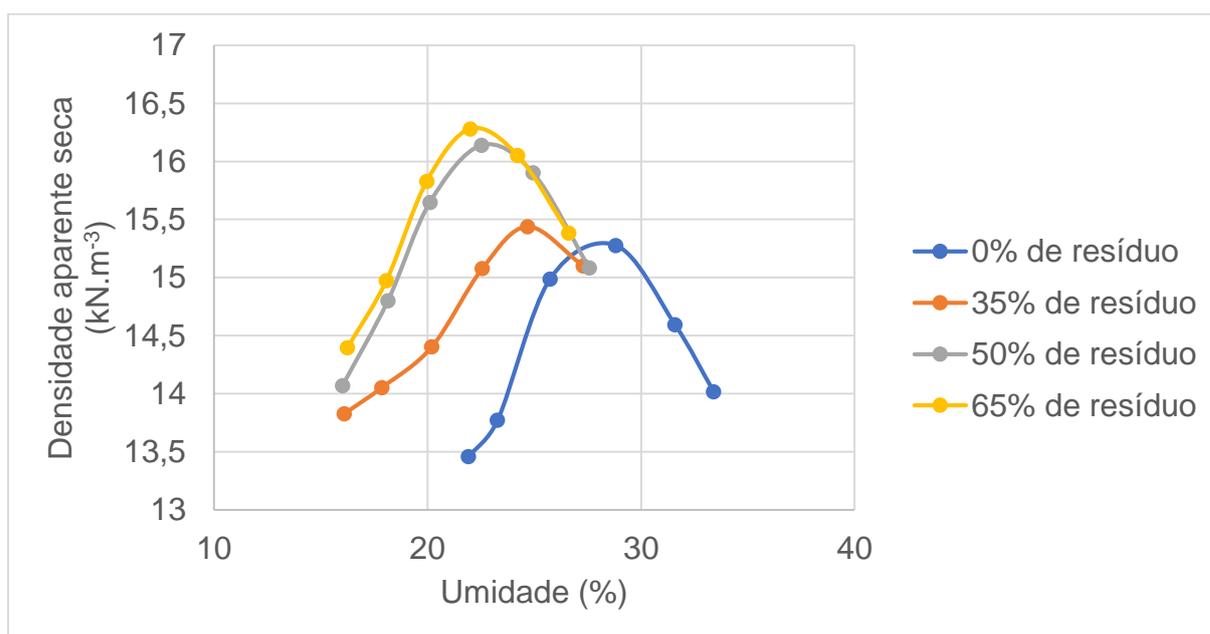
De maneira geral, pode-se afirmar que, quanto mais elevada for a densidade do solo, maior será sua compactação e menor sua porosidade total, o que neste caso indica que a mistura de 65% de resíduo ao solo é a mais indicada a ser utilizada em aterros compactados.

Tabela 5 – Valores de densidade aparente seca máxima e umidade ótima

Porcentagem de resíduo	0%	35%	50%	65%
Umidade ótima (%)	28,82	24,69	22,53	22,02
Densidade máxima (kN.m ⁻³)	15,28	15,44	16,14	16,28

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Curvas de compactação do solo e da mistura solo-areia de fundição



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Como especificado na metodologia, para os ensaios de compressão simples foram preparadas misturas de solo e ADF em determinadas porcentagens para a formação de moldes cilíndricos (Fig. 26) que posteriormente foram submetidos a compressão na prensa hidráulica.

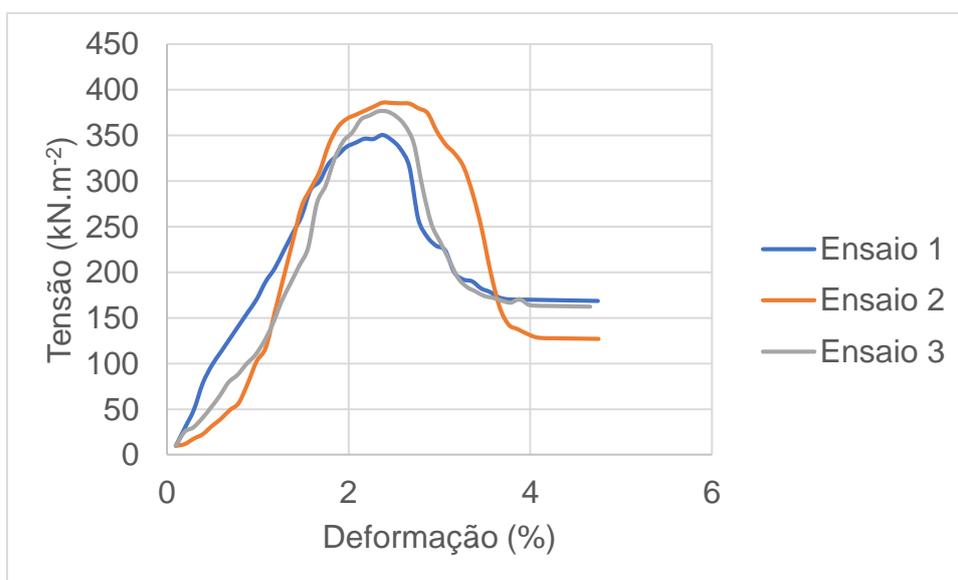
Figura 26 - Moldes rompidos utilizados nos ensaios de compressão simples



Fonte: Elaborada pelo autor.

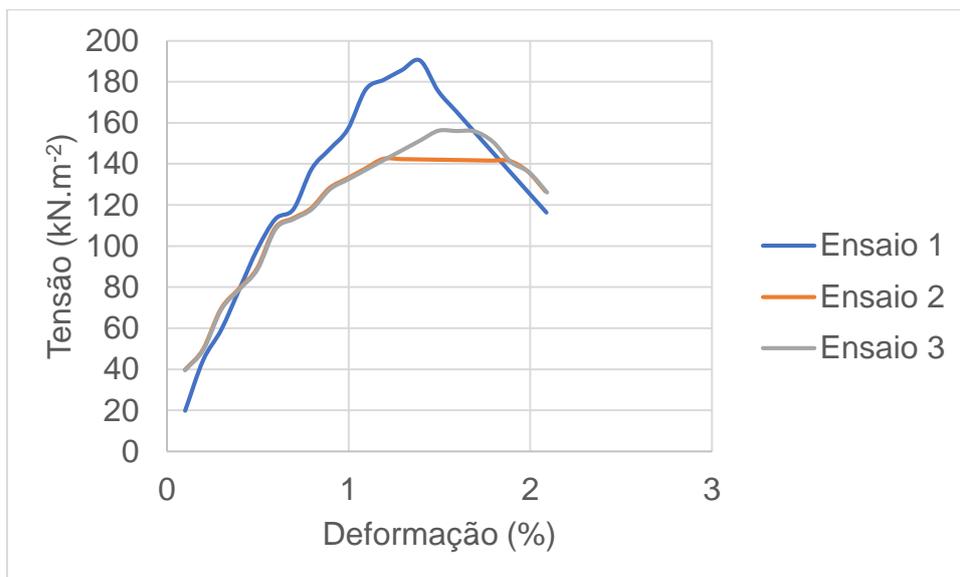
A seguir, nas figuras 27, 28, 29 e 30 estão apresentados os resultados, em triplicata, das tensões necessárias para o rompimento do molde cilíndrico de acordo com a deformação aplicada para cada porcentagem, inclusive para o solo puro.

Figura 27 - 0% de areia de fundição.



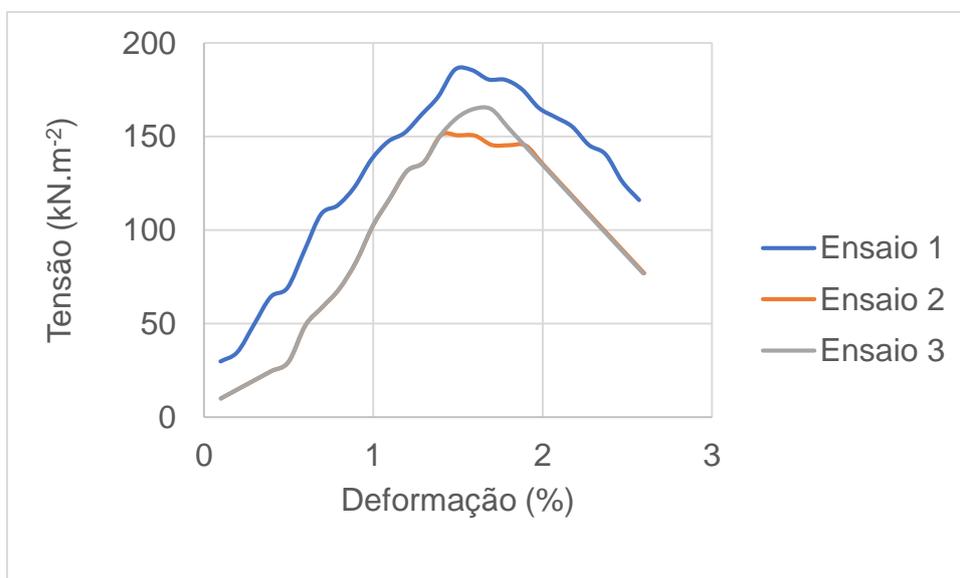
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 - 35% de areia de fundição



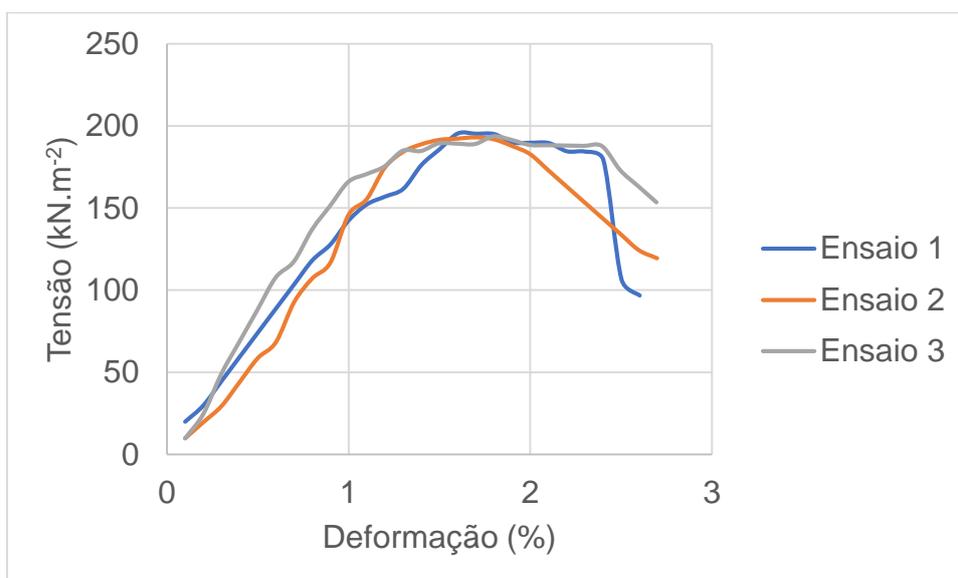
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 29 - 50% de areia de fundição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 - 65% de areia de fundição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

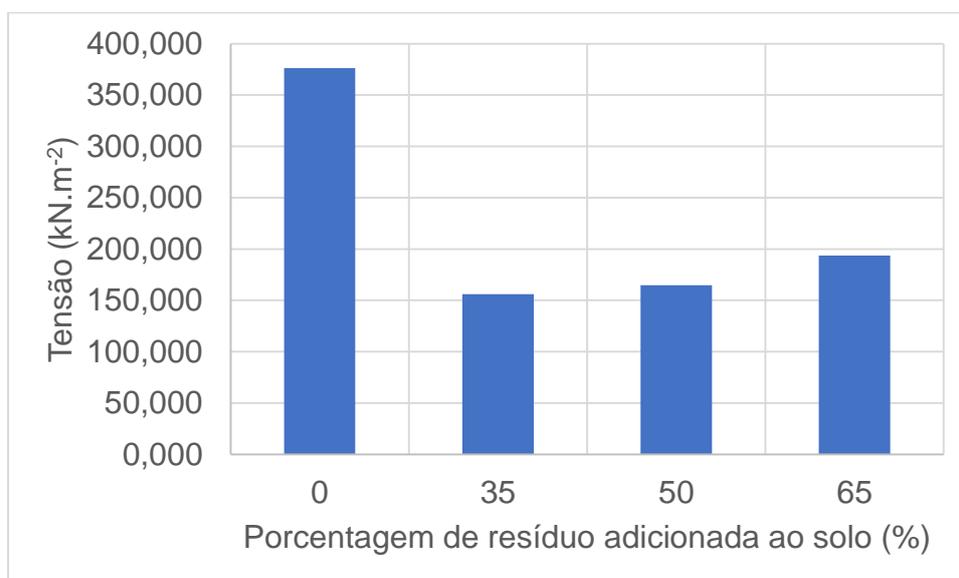
Os resultados dos ensaios de compressão simples mostram que o solo natural, ou seja, com 0% de ADF resiste a uma tensão maior antes do rompimento em relação as misturas de solo e areia. Obteve-se em média uma tensão de 385,97 kN.m⁻² para 0% de ADF, 156,168 kN.m⁻² para 35% de ADF, 164,778 kN.m⁻² com 50% de ADF e para 65% de ADF se obteve uma tensão média de 193,718 kN.m⁻². As deformações variaram de 1 a 2 % nas misturas e passaram de 2 % no solo natural. Os resultados detalhados estão apresentados na tabela 6 e na figura 31.

Tabela 6 – Tensões máximas necessárias para o rompimento dos moldes

Porcentagem de ADF (%)	Tensão aplicada (kN.m ⁻²)			
	1	2	3	Média
0	386,618	385,907	376,292	385,907
35	190,399	142,431	156,168	156,168
50	185,838	150,737	164,778	164,778
65	195,382	193,024	193,718	193,718

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Tensão máxima média para cada % de ADF



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora inicialmente a resistência tenha diminuído com a adição da areia de fundição ao solo compactado, observa-se que há um aumento da resistência com o acréscimo do teor de resíduo ao solo a partir da adição de 35% de ADF. Um estudo de KLINSKY (2012) também obteve resultados de redução da resistência com a adição de resíduo de ADF e cal.

Segundo Souza Pinto (2006) um fator que pode justificar essa diminuição da resistência à compressão simples se comparado a outros ensaios seria que, a resistência à compressão simples é ligeiramente menor com a redução da altura do corpo de prova e sendo um ensaio não-drenado o volume se mantém constante, portanto há um aumento na área transversal do corpo de prova. Assim, isto introduz tensões de tração nas bordas do corpo de prova que não são resistidas, abrindo-se fissuras ao longo de geratrizes do corpo de prova, através das quais as tensões efetivas não se transmitem.

Pode-se citar também alguns problemas neste ensaio tais como, impossibilidade de controle das condições como umidade e até mesmo ajuste da pressão, o efeito do atrito nas extremidades, efeito da amostragem e do molde e também pode ser levado em consideração que a ADF proveniente do jateamento perde todas suas propriedades após a queima com o metal fundido.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foi possível verificar que o reaproveitamento da areia de fundição deve ser visto como uma forma de as empresas, além de disporem seu resíduo, reduzam o consumo de novo insumos e matérias-primas e conseqüentemente a extração destes da natureza além de proporcionar uma fonte alternativa de renda.

Foram realizados ensaios de caracterização do solo e da areia de fundição para posteriormente realizar uma mistura do resíduo com o solo natural nas porcentagens de 35%, 50% e 65% e realizar testes de compactação e de resistência à compressão simples, comparando os resultados com os testes realizados com nenhuma adição de resíduo.

O uso de ADF incorporado ao solo apresentou os melhores resultados no ensaio de compactação com um padrão bem definido de comportamento, com o aumento da massa específica com a adição do resíduo, tendo o melhor resultado com 65% de ADF na mistura. A umidade ótima acompanhou o padrão de material granular apresentando diminuição contínua dos seus valores com o aumento da ADF.

Em relação aos ensaios de compressão simples, os resultados obtidos apresentaram uma redução na tensão necessária para o rompimento dos moldes em relação a amostra de solo puro, 0% de ADF, mas retomaram um crescimento com o aumento da quantidade de ADF na mistura, obtendo-se a maior tensão com 65% de resíduo adicionado. É necessário lembrar que como a areia utilizada é proveniente do jateamento das peças, que é um resíduo que perde totalmente suas propriedades estruturais devido as altas temperaturas, o que pode ter interferido nos resultados.

Como sugestão para trabalhos futuros, aconselha-se que se realizem testes com uma porcentagem superior a 65% de ADF misturada ao solo, já que a tendência dos gráficos apresentados, tanto nos ensaios de compactação como os de compressão, era de crescimento da resistência com a adição de resíduo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). **Revista da ABIFA**, 2014, Ano XVII. Ed. 171.

ALVES, B. S. Q. **Estudo da viabilidade ambiental da reutilização das areias descartadas de fundição**. 2012. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**: Solo Coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. 1 ed. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. 1 ed. Rio de Janeiro, 1986. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. 1 ed. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.702**: areia descartada de fundição – diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009.

ATLAS SOCIOECONOMICO DO RIO GRANDE DO SUL. **Tipos de solos**. 2018. 1 fotografia, color. Disponível em: <http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/solos>. Acesso em: 01/07/2018.

BONET, I. I. **Valorização do resíduo areia de fundição (RAF) incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.** 2002. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 307** - Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil de 17 de julho de 2002.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. (Acesso em 15/05/2017).

BRASIL FERROVIÁRIO. **Compactação dos Solos**. 2018. 1 fotografia, color. Disponível em: <http://www.brasilferroviario.com.br/compactacao-dos-solos/>. Acesso em: 04/07/2018.

CASTRO, Franciele Oliveira. **Caracterização e determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade do solo do campus da UFFS**. 2017. 76f. Trabalho de conclusão de curso (obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2017.

COSTA NETO, P. L. O. Estatística. In: _____. **Amostragem a esmo ou sem norma**. 2.ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1977. Cap. 3, p. 42.

MELLO, O.J. **Estudo da viabilidade da reutilização de resíduo de areia verde de fundição em argamassa colante – enfoque ambiental**. 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2004.

DE OLIVEIRA, F. B., da Glória Alves, M., & de Oliveira, C. H. R. (2012). **Favorabilidade de áreas para implantação de aterros controlados no município de Campos dos Goytacazes/RJ utilizando sistema de informação geográfica**. Revista Brasileira de Cartografia.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro. EMBRAPA-SPI, 2006.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER (FEPAM). **Relatório sobre a geração de resíduos sólidos industriais no estado do Rio Grande do Sul**, Rio Grande do Sul, 2003

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER (FEPAM). **Revista da FEPAM**, volume 2, nº 1 janeiro a dezembro de 2008.

JSA EMPREITEIRA. **Fundação de casa**. [2018?]. 1 fotografia, color. Disponível em: <https://www.jsaempreiteira.com.br/fundacao-de-casa.html>. Acesso em: 04/07/2018.

KER, J. C. **Latosolos do Brasil: uma revisão**. Revista Geonomos, v. 5, n. 1, 1997.

KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez; FABBRI, Glauco Tulio Pessa; FURLAN, Ana Paula. **Efeito da adição de areia de fundição e cal em algumas propriedades de solos argilosos**. TRANSPORTES, v. 20, n. 1, p. 22-30, 2012.

KLINSKY, L. M. G., dos Santos Bardini, V. S., & Fabbri, G. T. P. (2014). Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos argilosos no módulo de resiliência. TRANSPORTES, 22(2), 1-10.

LABGEO. **Ensaio realizados – compactação**. [2018?]. 1 fotografia, color. Disponível em <http://www.labgeo.ufscar.br/ensaios.php?item=4>. Acesso em 04/07/2018.

LIMA, G. T. S. **Análise de resistência e microestrutura em concretos com substituição parcial de areia natural por areia de fundição**. 2014. 96f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil). UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí – RS, 2014.

LOPES, L. R. N. **Avaliação da redução dos resíduos sólidos de areia resinada em fundição de aço através de recuperação térmica**. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

OLIVEIRA, G. V. **Aplicações potenciais para as areias descartadas de fundição: um estudo exploratório**. 2016. 81f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PENKAITIS, G. **Impacto ambiental gerado pela disposição de areias de fundição: estudo de caso.** 2012.91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PIVETTA, Carlise Patrícia. **Utilização do resíduo de construção e demolição em solo compactado.** 2017. 53f. Trabalho de conclusão de curso (obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2017.

QUISSINI, C. S. **Estudo da aplicação da areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos.** 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.

RIBAS, C. L. **Registro de possibilidades de reaproveitamento de areia descartada de fundição em substituição a areia natural na fabricação de blocos e pisos de concreto.** 2016. 60f. Dissertação (Monografia do Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia Industrial apresentado como requisito parcial para obtenção de título de Especialista em Engenharia Industrial) - UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi –RS, 2016.

SOLOCAP. **Equipamentos.** 2018. 1 fotografia, color. Disponível em: <http://www.solocap.com.br/detalhe.asp?idcod=CASAGRANDE>. Acesso em: 03/07/2018.

SANTOS, J. **Compactação. Elementos Teóricos.** Folhas de apoio à disciplina de Obras Geotécnicas, Engenharia Civil, IST UTL, 2008.

SANTOS, R. C. **Produto à base de areia preta de fundição reutilizada é feito por interno de instituição em Limeira. Fábrica produz tijolo desenvolvido no Ceset.** Jornal da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 14 a 20 de Julho de 2003.

SOUZA PINTO, Carlos. **Curso Básico de mecânica dos Solos.** 3º Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.