



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

DIANA THAÍS BÄR

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO COM ADIÇÃO DE
AREIA DE FUNDIÇÃO**

CERRO LARGO

2018

DIANA THAÍS BÄR

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO COM ADIÇÃO DE
AREIA DE FUNDIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vendruscolo

CERRO LARGO

2018

PROGRAD/DBIB - Divisão de Bibliotecas

Bär, Diana Thaís

Determinação da resistência de um solo com adição de areia de fundição/ Diana Thaís Bär. -- 2018.

60 f.:il.

Orientador: Márcio Antônio Vendruscolo.

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

1. Determinação da resistência de um solo argiloso
com areia de fundição. 2. Reutilização da areia de
fundição. I. Vendruscolo, Márcio Antônio, orient. II.
Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

DIANA THAÍS BÄR

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM SOLO COM ADIÇÃO DE
AREIA DE FUNDIÇÃO**

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:

____/____/____

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Márcio Antônio Vendruscolo – UFFS

Membro da banca



Prof. Dr. Juliana Marques Schöntag – UFFS

Membro da banca



Prof. Dr. Mario Sergio Wolski – UFFS

Membro da banca

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Alexandre e Jane, que me deram amor, incentivo e suporte durante toda esta trajetória, nunca deixando de acreditar no meu potencial.

Ao professor orientador Márcio Antônio Vendruscolo, pela atenção, orientação, incentivo e amizade ao longo desta pesquisa.

As minhas colegas e amigas Aline, Débora, Laura e Natali, pela amizade e companheirismo, por estarem sempre ao meu lado, nos momentos bons e ruins.

Aos demais colegas, amigos e namorado, que me encorajaram e me fortaleceram na busca dos meus objetivos.

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

A Universidade Federal da Fronteira Sul, pelos auxílios prestados e pela oportunidade de acesso a um ensino de qualidade.

A A. J. Borghetti e Cia LTDA e seus responsáveis, por terem cedido o material para que esta pesquisa pudesse ser realizada.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma torceram para que eu conseguisse chegar até aqui.

RESUMO

A areia de fundição é o principal resíduo das indústrias de fundição e, por consequência disso, vem se difundindo cada vez mais a busca por alternativas para reutilizar essa areia em grandes quantidades, com o intuito de preservar os recursos naturais e diminuir a degradação do meio ambiente. Assim, este trabalho avaliou a possibilidade de reutilizar a areia de fundição, misturada a solos argilosos, como material para base e sub-bases de pavimentos e para cobertura de aterros sanitários. Os materiais utilizados nesta pesquisa consistem numa combinação de solo e areia de fundição. Primeiramente foram executados ensaios de caracterização da areia de fundição e ensaios de compactação. Os teores de areia de fundição adicionados ao solo foram de 0%, 35%, 50% e 65%. Amostras cilíndricas de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura foram moldadas para a verificação da resistência à compressão simples dos materiais. Através dos testes de compactação, observou-se que a umidade ótima diminuiu e o peso específico aumentou com a adição de areia de fundição. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples demonstraram, de um modo geral, que com o acréscimo da areia de fundição há um aumento da resistência. O material com adição de 50% de resíduo apresentou uma melhor resistência.

Palavras-chave: Areia de fundição. Compactação. Solo do Campus da UFFS.

ABSTRACT

The sand casting is the main residue of the foundry industries and consequently the search for alternatives to reuse this sand in large quantities has been increasing, with the purpose of preserving the natural resources and reducing the degradation of the environment. So, this work evaluated the possibility of reusing sand casting mixed with clay soils, as material for base and sub-base of pavements and material to landfill. The materials used in this research consist of a combination of soil and sand casting. Firstly, sand casting characterization tests and compaction tests were performed. The levels of foundry sand added to the soil were 0%, 35%, 50% and 65%. Cylindrical samples of 5 cm in diameter and 10 cm in height were molded to verify the resistance to simple compression. Through the compaction tests, it was observed that the optimum humidity decreased and the specific weight increased with the addition of casting sand. In general, the results of the simple compression strength tests showed that with the addition of the casting sand there is an increase in the resistance. The material with 50% residue addition showed better resistance.

Key word: Casting sand. Compression. Soil of the UFFS Campus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo típico da areia em processo de fundição	20
Figura 2 – Representação esquemática da fundição em molde de areia	22
Figura 3 – Classificação Textural do Natural Resources Conservation Service (USDA)	30
Figura 4 – Limites de Atterberg	35
Figura 5 – Curvas de compactação.....	39
Figura 6 – Fluxograma dos métodos utilizados no estudo	41
Figura 7 – Amostras do solo dispostos em bandejas	42
Figura 8 – Areia verde de fundição	43
Figura 9 – Cilindro para ensaios de compactação, soquete para ensaios de compactação e extrator hidráulico.....	45
Figura 10 – Aparelho para ensaio de compressão simples.....	46
Figura 11 – Curva Granulométrica por peneiramento.....	48
Figura 12 – Curvas de compactação.....	49
Figura 13 – Curva de resistência a compressão simples para 0% ADF	50
Figura 14 – Curva de resistência a compressão simples para 35% ADF	51
Figura 15 – Curva de resistência a compressão simples para 50% ADF	51
Figura 16 – Curva de resistência a compressão simples para 65% ADF	51
Figura 17 – Curva de resistência a compressão simples para 0, 35, 50 e 65% ADF	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos resíduos NBR 10004/2004 da ABNT.	24
Tabela 2 – Composição da amostra de solo e ADF.....	44
Tabela 3 – Densidade real dos grãos	47
Tabela 4 – Umidade ótima e peso específico ótimo	50
Tabela 5 – Valores máximos de tensão e suas respectivas médias	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação HRB.....	31
Quadro 2 – Nomenclatura de Classificação do Sistema HRB.....	32
Quadro 3 – Classificação SUCS.....	33
Quadro 4 – Terminologia do Sistema Unificado.....	33
Quadro 5 – Escala Granulométrica de acordo com a NBR 6502/1995 da ABNT.	37

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos Sólidos
ABIFA	Associação Brasileira De Fundação
ABNT NBR	Norma Brasileira aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADF	Areia de Fundação
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Social
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
LC	Limites de Contração
LL	Limites de Liquidez
LP	Limites de Plasticidade
RADF	Resíduo de areia de fundição
RU	Restaurante Universitário
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
UFFS	Universidade Federal da Fronteira Sul
USDA	Natural Resources Conservation Service

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO	17
3.1.1 Componentes da areia verde de fundição	17
3.2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO	19
3.2.1 Preparação de areia de moldagem	21
3.2.2 Macharia	21
3.2.3 Moldagem	21
3.2.4 Fusão	22
3.2.5 Desmoldagem	22
3.2.6 Acabamento	23
3.2.7 Tratamento Térmico	23
3.3 PROBLEMÁTICAS DO DESCARTE DE ADF	23
3.3.1 Reciclagem e reaproveitamento da ADF.....	25
3.3.2 Regeneração da ADF.....	27
3.4 UTILIZAÇÃO DO SOLO NO CONTEXTO DA ENGENHARIA CIVIL.....	28
3.5 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.....	29
3.6 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	34
3.6.1 Umidade Natural e Densidade Real dos Grãos	34
3.6.2 Limites de Atterberg	34
3.6.3 Curva Granulométrica	36
3.7 COMPACTAÇÃO DO SOLO	37

3.8 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	40
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	41
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	41
4.2 MATERIAIS	41
4.2.1 Solo.....	41
4.2.2 Areia de fundição (ADF).....	42
4.2.3 Água	43
4.3 MÉTODOS.....	43
4.3.1 Métodos para a caracterização da ADF	43
4.3.2 Ensaios de compactação	44
4.3.3 Ensaios de compressão simples	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ADF.....	47
5.1.1 Densidade real dos grãos.....	47
5.1.2 Granulometria por peneiramento	48
5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	48
5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	50
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	Erro! Indicador não definido.
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

O interesse da sociedade em mitigar os danos provocados no meio ambiente cresce cada vez mais, tornando o desenvolvimento sustentável um dos temas mais abordados atualmente por pesquisadores e instituições da área de construção civil, que estão sempre buscando alternativas e soluções para minimizar tais impactos.

Tendo em vista que a areia de fundição é considerada um dos resíduos sólidos que possui maior volume de produção no Brasil, esse trabalho tem como objetivo apresentar um destino adequado e viável para o mesmo. De acordo com a ABIFA, a produção de areia de fundição no Brasil mostra crescimento contínuo, mantendo uma produção média de 3 milhões de toneladas por ano.

Segundo Oliveira (2007), pode-se citar duas das grandes responsáveis pela alta geração da areia descartada: as peças fundidas com defeitos; e os moldes e machos que não puderam ser utilizados no processo de vazamento por problemas detectados em suas estruturas. Em ambas as situações haverá consumo de areia nova e de aglomerantes, além da geração de mais resíduo. No entanto, a indústria de fundição tem evoluído constantemente em suas técnicas de produção para melhorar a qualidade final das peças, otimizando o consumo de areia nova e a redução da areia descartada.

A NBR 15702/2009 da ABNT normatiza a aplicação da areia de fundição em aterros sanitários e asfalto, que já é utilizada no estado de Santa Catarina, por exemplo, onde a valorização desse resíduo é regulamentada pela Resolução Normativa Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONSEMA). São fornecidas diretrizes para os procedimentos do licenciamento ambiental da utilização da areia descartada de fundição de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural (ROSSETTO, 2010).

No estado de São Paulo também já é permitida a utilização da areia de fundição na fabricação de asfalto e na construção de artefatos de concreto que não tenham funções estruturais, como tijolos e lajotas para calçadas. Porém, apesar da liberação, o uso é pequeno se comparado com o volume de resíduos produzidos pelas fundições (SANTOS et al., 2016).

A indústria da fundição é um segmento da economia que se caracteriza pela produção de bens intermediários e fornece seus produtos para diversos segmentos de mercado. O Brasil está, tradicionalmente, entre os dez maiores produtores mundiais de fundidos. A produção para o mercado interno está ligada diretamente ao desempenho do

mercado automobilístico que é, segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Social (BNDES), o maior consumidor de fundidos no Brasil (OLIVEIRA, 2007).

Ainda segundo Oliveira (2007), levando em consideração o fato de que a areia de fundição (ADF) pode não ser um resíduo totalmente inerte, a sua destinação deve ser criteriosamente definida. Torna-se necessário procurar alternativas de gerenciamento por motivos de: custos elevados de disposição em aterros sanitários e carência destes locais próximos às unidades geradoras do resíduo; majoração progressiva dos custos relativos à areia nova (aquisição, frete, estocagem); diminuição da ação extrativa e preservação dos recursos naturais.

Quando se incorpora a ADF ao solo natural, é possível obter como resultado final um material que se encaixe dentro das características de materiais granulares, o que resulta na melhora de suas características, principalmente no aumento da capacidade de suporte. Além disso, a incorporação desse resíduo a um solo local soluciona os problemas de exploração de jazidas de solos nobres, descarte de solos locais e gera o destino final para esse resíduo (TEIXEIRA, 2014).

Outra alternativa viável é a adição da ADF em solos compactados, visto que a compactação torna o material mais resistente e estável, podendo ser empregada em diversas áreas de atuação da engenharia (MORENO et al, 2015).

Baseado nessas informações, esta pesquisa buscou reutilizar esse resíduo, tendo como objetivo determinar a resistência à compressão simples do solo com areia de fundição, a partir de ensaios de compactação, realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é determinar a resistência à compressão simples de um solo argiloso misturado com areia de fundição.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Executar os ensaios de caracterização da ADF;
- Determinar os parâmetros de compactação somente do solo;
- Determinar os parâmetros de compactação do solo com a ADF;
- Avaliar a resistência à compressão simples somente do solo;
- Avaliar a resistência à compressão simples do solo com a ADF.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO

O processo de confecção de peças metálicas nas fundições se dá através da aplicação do metal líquido em moldes confeccionados com areia, que proporcionam à peça as características desejadas após a solidificação do metal. Esta areia é denominada de areia verde de fundição (DE MELLO, 2004).

De acordo com Klinsky e Fabbri (2008), no processo de fundição a areia é combinada com aglomerantes, podendo estes serem orgânicos (naturais ou sintéticos) ou inorgânicos, água e aditivos. Os aglomerantes orgânicos naturais são: óleos secativos (óleo de linhaça, mamona, entre outros), farinha dos cereais (mogul, dextrina) e, ainda, dentro dos aglomerantes orgânicos, existem os sintéticos, como as resinas (resinas furânicas e resina fenólica). Já os aglomerantes inorgânicos são: argilas (bentonita é a mais utilizada), cimento Portland e silicato de sódio.

A areia verde de fundição adquire algumas características quando misturada com seus outros componentes, como por exemplo: maleabilidade; compatibilidade; refratariedade; coesão; resistência a esforços mecânicos, como compressão e tração; expansividade volumétrica; permeabilidade; e perfeita desmoldagem (BONIN, ROSSINI e ZABIM, 1995).

3.1.1 Componentes da areia verde de fundição

Segundo De Mello (2004), a areia verde é composta por areia base, pó de carvão, argila ativada (bentonita) e água e, em alguns casos, é também composta por amido de milho. As descrições serão apresentadas a seguir.

a) Areia base:

A areia base é um material refratário em estado solto e granular que pode ser produzido artificialmente, ou pela decomposição das rochas pela ação natural da água, vento, gelo ou erosões (CARNIN, 2008).

Segundo estudos feitos por Ribas (2016), a areia base utilizada no processo de fundição é constituída de grãos de tamanhos entre 0,05 mm e 2 mm, que são peneirados para separação de acordo com seu tamanho. Essa areia base é extraída de jazidas ou de rios, considerada um bem não renovável, cujo beneficiamento invariavelmente causa impactos ambientais adversos.

A areia base também é conhecida como areia de sílica, e é a mais utilizada devido à sua maior disponibilidade e menor custo. Para o processo de moldagem, a areia não deve conter impurezas. Para isso, é necessário que a areia passe pela usina de beneficiamento, onde o minério é lavado com hidróxido de sódio (CARNIN, 2008).

b) Pó de carvão:

O pó de carvão utilizado na composição de areia de moldagem é conhecido como “Cardiff”, e é um material extremamente volátil e com grande poder de expansibilidade ao ser aquecido. A sua adição na mistura visa principalmente reduzir a expansão da sílica, evitar a penetração do metal líquido no molde de areia verde e melhorar o acabamento final da peça (DE MELLO, 2004).

c) Amido de milho:

O amido de milho é um material orgânico, tem forma granular e é usado como aglomerante na mistura de moldagem. Quando utilizado, fornece plasticidade à areia verde e mantém sua umidade. O amido de milho também auxilia na redução dos efeitos de expansão térmica das sílicas, na retenção da umidade e no aumento da resistência à compressão a seco. Normalmente, é utilizado somente em moldes muito grandes e que necessitam de muita plasticidade (DE MELLO, 2004).

d) Argila ativada (bentonita):

A bentonita é uma argila de material lamelar, composta de silicato de alumina hidratado, sendo o principal aglomerante da areia verde de moldagem. A bentonita possui função coesiva, tornando a caixa de moldagem resistente durante o vazamento do metal líquido no molde (DEMATTE, 2000).

O uso da bentonita na mistura é definido pela escoabilidade, consistência e plasticidade atingidas, obtendo-se moldes uniformemente compactados, que reproduzem fielmente as dimensões do modelo. A bentonita perde suas características físicas quando ocorre o vazamento, devido ao comportamento térmico e volumétrico de sua formação mineralógica. Devido às perdas das características coesivas e refratárias, há a necessidade de constante reposição (BONIN, ROSSINI e ZABIM 1995).

e) Água:

A água é responsável pela capacidade coesiva da mistura, pela retenção da umidade e deve ser controlada para não prejudicar o processo de moldagem. Se tiver pouca umidade a mistura fica sem poder de inchamento, e seu excesso dificulta o trabalho de compactação (DE MELLO, 2004).

3.2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

De acordo com Carnin (2008), a tecnologia da fundição é o princípio clássico de Arquimedes, “o líquido toma a forma do vaso que o contém”.

Segundo Klinsky e Fabbri (2009), a fundição é a produção de peças metálicas que são obtidas vertendo-se um metal ou uma liga metálica fundida sobre um molde oco, geralmente feito de areia. Há muito tempo as areias têm sido utilizadas para a fabricação de moldes que dão a forma aos metais, essas que são economicamente viáveis, altamente refratárias e facilmente coesíveis ao serem misturadas com argilas ou outros aditivos orgânicos ou inorgânicos.

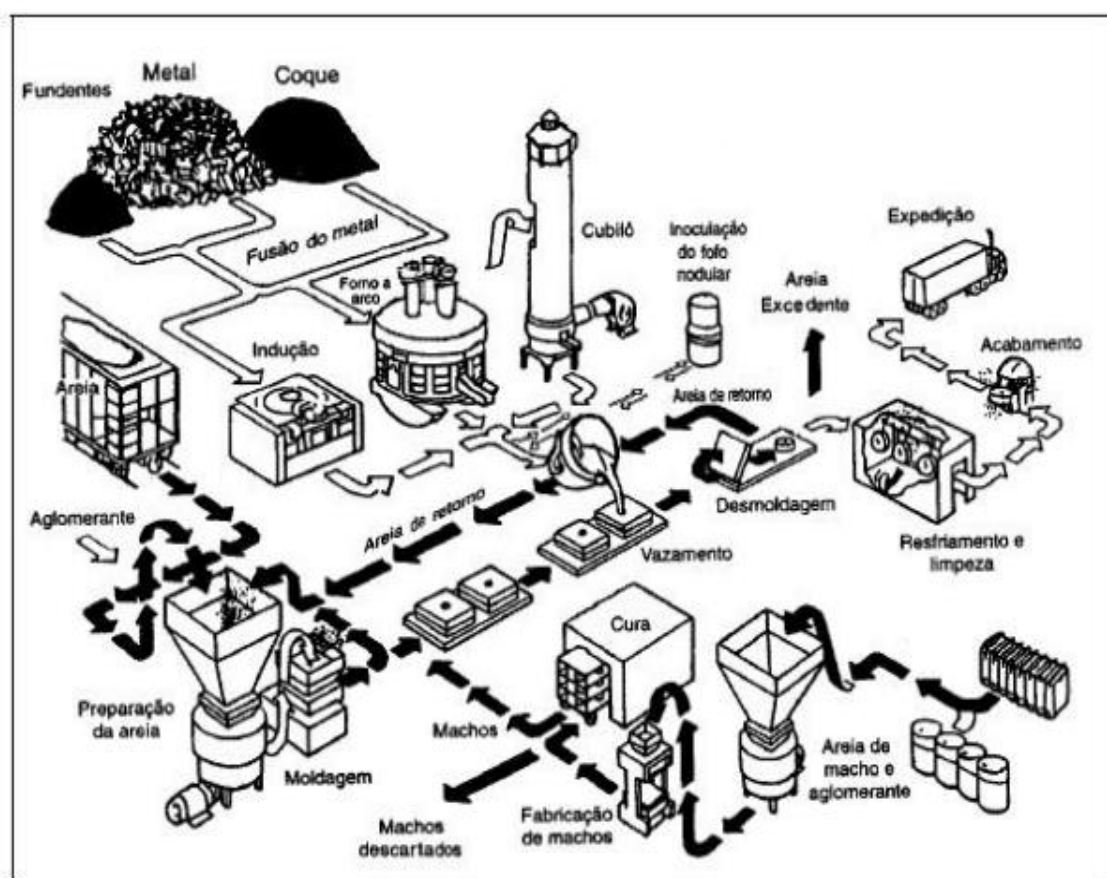
Nos últimos anos, foi observado um grande crescimento desse tipo de indústria, o que tem provocado aumento nas quantidades de resíduos gerados, apresentando um risco para o meio ambiente. Esse resíduo é controlado pelos órgãos de defesa do meio ambiente, como Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), esses que indicam as diretrizes de controle ambiental (DE MIRANDA, 2015).

A fundição com areia verde emprega nos seus processos modelos, moldes e machos: os modelos se tratam de uma réplica perfeita da peça que será produzida acrescida nas dimensões de material para compensar a contração e usinagem; os machos

se tratam de peças a serem fundidas que apresentam detalhes ou cavidades, que servem para dar forma à peça desejada; já o molde tem por função oferecer o formato negativo da peça na qual será vazado o metal líquido (CHEGATTI, 2004).

A Figura 1 apresenta o fluxo típico de uma planta de fundição. O fluxo destacado se refere à areia que é reaproveitada, após a etapa de desmoldagem em um novo ciclo de produção de moldes (SILVA, 2010).

Figura 1 – Fluxo típico da areia em processo de fundição



Fonte: Oliveira, 2007.

O processo de fundição se inicia com a alimentação de argila, areia base, areia de retorno e aditivos necessários, os quais são devidamente balanceados para atenderem às aplicações específicas. Compreende as seguintes etapas: preparação de areia de moldagem; macharia; moldagem; fusão; desmoldagem; acabamento; e tratamento térmico.

3.2.1 Preparação de areia de moldagem

A areia verde de fundição é uma mistura de areia base, argila, pó de carvão e água. Estes materiais são misturados para que ocorra o processo de hidratação da argila (bentonita), sendo elaborada nos Misturadores de Areia, onde a areia atinge as propriedades desejadas, de forma que possa ser utilizada inúmeras vezes. A cada mistura é feita uma correção desta areia através do acréscimo de areia nova e aditivos, cujos teores são previamente calculados. A quantidade de água adicionada é medida através de um controlador de compactabilidade, para que a areia esteja com a umidade final pretendida quando cair na máquina de moldar. Quando esgotar o tempo de mistura, a areia estará pronta para seguir para o processo de moldagem mais uma vez (ROSSETTO, 2010).

3.2.2 Macharia

A macharia é o setor onde ocorre a confecção dos machos em areia aglomerada com resinas, esses que são necessários para proporcionar os espaços vazios e ocos na peça. Para o preparo das areias de macharia utilizam-se resinas sintéticas misturadas a areia-base. O emprego deste tipo de resinas confere às peças um melhor acabamento e uma boa resistência aos machos, porém, após a desmoldagem da peça, a areia fica contaminada com a resina fenólica (SCHEUNEMANN, 2005).

3.2.3 Moldagem

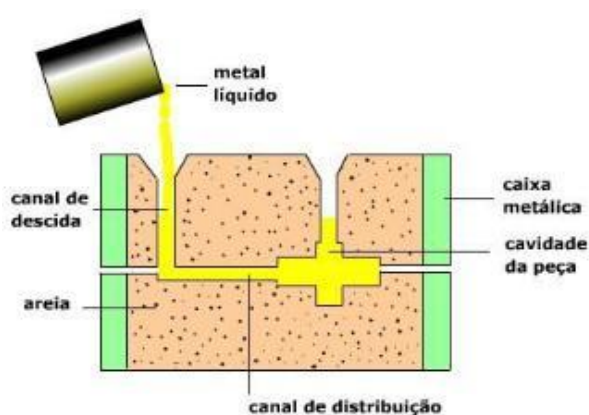
As caixas de moldagem são utilizadas para manter a areia utilizada na realização de um molde. No processo de moldagem, a produção de uma peça fundida de projeto simples é feita através das seguintes etapas: fabrica-se o modelo a partir do desenho da peça, onde se amassa a mistura de areia de moldagem, usando caixas de moldagem para suportar as faces laterais do molde; o modelo é removido e os machos são colocados em posição; a parte superior e inferior do molde são fechadas e, depois de prontos, seguem para a linha de vazamento, onde serão alimentados com metal líquido, proveniente da “Fusão”. O material da areia de moldagem mantém a forma da cavidade até a solidificação do metal vazado nele (ROSSETTO, 2010).

O processo de moldagem é do tipo regenerativo, ou seja, o material que chega no final do ciclo de trabalho retorna ao início do processo, por meio de correias transportadoras, ocorrendo a reutilização da areia. É necessário fazer o descarte de parte dessa ADF, por motivos de perda de volume e de descaracterização dos componentes da mistura. Por isso, se torna também necessário fazer a frequente reposição de matérias-primas e frequente controle de qualidade (CARNIN, 2008).

3.2.4 Fusão

Com a utilização de fornos de fusão, é obtido o estado líquido do metal. A alimentação do metal líquido ocorre a partir de um sistema de canais existentes no molde. Para permitir que o metal escorra para a cavidade do molde, são abertos os canais de alimentação (CARNIN, 2008). Na Figura 2, está representado o esquema da fundição em molde de areia, quando ocorre o vazamento do metal líquido nas caixas de moldagem.

Figura 2 – Representação esquemática da fundição em molde de areia



Fonte: Google Imagens.

3.2.5 Desmoldagem

A peça passa pelo processo de desmoldagem após a solidificação e resfriamento. Essa etapa se dá através de um conjunto de moldagem para retirar a mistura de areia e posteriores etapas do acabamento. A areia removida retorna ao processo de preparação de areias, onde recebe incremento de areia nova, argila, pó de carvão, aditivos e água, a fim de readquirir suas características de areia verde (ROSSETTO, 2010).

3.2.6 Acabamento

Para atingir a usinagem superficial da peça, é realizada a limpeza das peças através de jateamento, escovação e esmerilhamento. As peças são colocadas em local adequado para então quebrar com marreta e martelo (manualmente) os canais e massalotes, que são classificados como sucata, pois não fazem parte da peça. O jateamento com granalha de aço consiste em colocar a peça, já sem canais e massalotes, em uma câmara onde é realizado o jateamento com granalha de aço, deixando assim a peça mais limpa. No acabamento final, a escovação e a esmerilhamento consistem na remoção de rebarbas através do uso de esmeris (OLIVEIRA, 1998).

3.2.7 Tratamento Térmico

Depois que as peças são rebarbadas, elas podem necessitar algum tipo de tratamento térmico para rearranjo de sua estrutura interna, esta que é executada em fornos especiais (ROSSETTO, 2010).

Estando a peça dentro dos padrões, ela é levada para um local onde deve ser protegida do excesso de poeira, para que seja mantida a qualidade necessária para a utilização (DE MELLO, 2004).

3.3 PROBLEMÁTICAS DO DESCARTE DE ADF

A preocupação com as questões de saneamento básico como a coleta e o tratamento de resíduos está se tornando cada vez maior nos municípios brasileiros. No Brasil, toneladas de resíduos são geradas diariamente pelos domicílios, indústrias e setores de serviços. Os resíduos industriais devem ser o maior alvo de controle por parte dos órgãos ambientais, devido ao seu alto potencial de periculosidade e consequente geração de impactos ambientais quando não destinados de forma adequada (PENKAITIS, 2012).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos Sólidos (ABETRE, 2010), apenas 22% dos resíduos industriais têm destinação correta, onde 16% desses resíduos vão para aterro, 1% é incinerado e 5% é co-processado,

transformando-se em combustível para a indústria de cimento. Já os 78% restantes são despejados de forma inadequada e irregular.

Essa disposição adequada dos resíduos sólidos é um dos maiores desafios contemporâneos, em termos ambientais. A areia de fundição é o principal resíduo sólido da indústria de fundição e, nos últimos anos, experimentou um rápido crescimento que tem representado um aumento na demanda de espaço para sua disposição, o que se traduz em custos mais elevados para o setor (KLINSKY e FABBRI, 2009).

Após a utilização na indústria de fundição, a areia se torna um problema ambiental, pois pode estar contaminada por elevadas concentrações de metais, dependendo do processo empregado. Nela, podem ser encontrados elementos e compostos químicos como: arsênio, bário, cádmio, cloretos, chumbo, fenóis, sódio e surfactantes (NETO e FABBRI, 2004).

Os resíduos sólidos são considerados como perigosos quando suas características apresentam risco à saúde pública e riscos ao meio ambiente, e quando gerenciados de forma inadequada. A NBR 10004/2004 da ABNT compreende a identificação do processo que gerou o resíduo, as características dos seus constituintes e faz a comparação destes com as listagens de substâncias, cujo impacto à saúde e ao meio ambiente já é conhecido. A NBR 10004/2004 classifica os resíduos em duas classes, segundo sua composição e propriedades (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação dos resíduos NBR 10004/2004 da ABNT.

Classificação dos resíduos		
Classe I	Classe II	
Perigosos	Não perigosos	
	Tipo A	Tipo B
	Não-inertes	Inertes

Fonte: NBR 10004/2004 da ABNT e elaborado pela autora, 2018.

O resíduo de areia de fundição (RADF) é classificado como resíduo classe II A, e apresenta alumínio, ferro e manganês no ensaio de solubilização, acima do valor máximo permitido da norma (ABIFA, 2006).

Os órgãos ambientais do Brasil utilizam a Norma NBR 10004 como parâmetro para decidir o que fazer com o RADF, com exceção o estado de São Paulo. Acaba por se fazer necessário que as empresas enviem os resíduos para aterros comerciais, ou

recomenda-se construir aterros próprios. Estes procedimentos adotados pelas empresas ocorrem porque existe uma lacuna na Norma, que não define a possibilidade do reaproveitamento do RADF (CARNIN, 2008).

A disposição de areia de fundição em áreas não licenciadas era uma prática empregada por muitas empresas do setor. Porém, a ação de entidades não governamentais, do Ministério Público e dos órgãos ambientais diminuiu essa prática, fazendo com que as empresas aumentassem a taxa de reciclagem da areia e dispusessem os seus resíduos em aterros sanitários licenciados perante os órgãos ambientais e, atualmente, o gerenciamento de resíduos de areias de fundição vem sendo alvo de controle dos mesmos (PENKAITIS, 2012).

Uma das maneiras de diminuir a problemática de descarte de ADF consiste na sua potencialidade de reciclagem, reaproveitamento e regeneração desta areia, sendo a aplicação mais comum na construção civil, através da inserção da areia residual como substituta de matéria-prima na fabricação de concreto, materiais cerâmicos, tijolos, entre outras aplicações (OLIVEIRA, 2016).

3.3.1 Reciclagem e reaproveitamento da ADF

Diversos trabalhos técnicos defendem a reutilização de areias de fundição, porém, enfrentam um grande obstáculo: o preconceito com relação a possíveis riscos relacionados à concentração de metais no material, independente dos níveis de concentração. A concentração de metais presentes nas areias deve ser avaliada de forma que impeça qualquer situação de risco, não só ao meio ambiente, mas à saúde pública (PENKAITIS, 2012).

Para fazer o reaproveitamento, reciclagem e regeneração da ADF, é de extrema importância identificar a caracterização do resíduo, para assim poder gerenciá-lo técnica e economicamente de maneira correta. A caracterização permite identificar substâncias, analisar sua origem, quantidade e potencialidade de danos ao ambiente (OLIVEIRA, 2007).

A reciclagem é um processo onde o produto final é submetido, a fim de devolver-lhe as características que tornem possível seu uso em um processo produtivo, novamente como matéria-prima. A reciclagem auxilia na diminuição dos descartes em aterros industriais, de acúmulos de passivos ambientais, poupando a natureza com a redução da extração dos componentes para a produção de areia nova (PINTO, 2013).

Apesar do preconceito com as possíveis concentrações de metais contidas na ADF, muitos estudos estão sendo ou já foram realizados, visando reduzir os impactos ao meio ambiente e obter matéria-prima para a construção civil.

Como exemplo, pode ser citado o resultado de um projeto desenvolvido por alunos da Universidade de Caxias do Sul (UCS), com o apoio de indústrias caxienses, que já estão licenciadas para utilizar a ADF como matéria-prima na construção de blocos de concreto. Após muitos estudos, testes e análises da areia e do produto final, a viabilidade desse reaproveitamento foi comprovada. Constatou-se 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 e se ficaria abaixo do limite de toxicidade permitido pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente, o que foi comprovado na pesquisa (RIBAS, 2016).

Nos países de “primeiro mundo”, o emprego do RADF em pavimentação também é de grande interesse. O reaproveitamento do RADF como agregado em misturas asfálticas pode contribuir tanto para reduzir o volume de material descartado quanto para atender à grande demanda regional de agregados para pavimentação de ruas e estradas. Existem muitas agências governamentais, organizações privadas e instituições que investem em pesquisas que busquem conciliar a crescente necessidade de reutilização dos resíduos com as exigências técnicas, operacionais e econômicas da indústria de construção rodoviária, por meio da avaliação do desempenho mecânico (CARNIN, 2008).

Klinsky e Fabbri (2008) avaliaram a possibilidade de reutilizar o resíduo como base e sub-base de pavimentos de baixo volume de tráfego através de sua incorporação a solos argilosos, na busca de reutilizar a ADF em maiores quantidades. A partir de seus estudos, concluiu-se 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, material ideal para ser utilizado em bases e sub-bases de pavimentos de baixo custo.

Bonet (2002) cita mais uma opção para o setor da fundição: o reaproveitamento dos seus resíduos nos concretos betuminoso usinado a quente. O autor procura mostrar, através de ensaios, a possibilidade de sua incorporação nos CBUQs, sem afetar o dimensionamento estrutural do pavimento. Primeiramente, deve-se analisar o resíduo. Quando este for classificado como classe I (perigoso), deve-se fazer a recuperação energética para que este resíduo possa ser incorporado aos concretos betuminosos, sem

afetar o meio ambiente. Se o mesmo for considerado classe II, pode ser reaproveitado diretamente nas massas asfálticas.

Existem também muitos estudos para utilização da ADF como cobertura de aterros de resíduos domésticos, onde grandes volumes em áreas já são licenciados para receber resíduos classe II – A. Essa alternativa poderia reduzir custos e impactos ambientais na gestão de aterros, eliminando a necessidade de buscar terra para cobertura. A CETESB se mostrou favorável, desde que sejam em aterros licenciados e seja feito um trabalho de engenharia que comprove a viabilidade técnica na manutenção ou melhorias nas características das coberturas originalmente prevista em projeto (RIBAS, 2016).

3.3.2 Regeneração da ADF

Na regeneração, a areia passa por processos de limpeza, tornando-a com características mais próximas possíveis da areia nova, existindo várias tecnologias para tal procedimento (OLIVEIRA, 2016).

Uma areia é considerada regenerada quando pode substituir a areia nova em qualquer das situações em que se usa areia nova na fundição como, por exemplo, na fabricação de machos, na fabricação de moldes com areia, e na diluição do sistema de areia verde. A regeneração deve compreender as seguintes etapas: desagregação de torrões e grumos, ou seja, liberação dos grãos individuais da areia; remoção dos resíduos metálicos; limpeza superficial dos grãos, ou seja, remoção dos resíduos de aglomerantes, aditivos e seus produtos de decomposição aderidos aos grãos; e classificação da areia regenerada, de modo a restabelecer a granulometria desejada (SCHEUNEMANN, 2005).

Existem três processos de regeneração da areia de fundição: regeneração mecânica, térmica e úmida. Entretanto, Scheunemann (2005) ainda ressalta em seus estudos que existe mais um processo de regeneração da areia de fundição além dos três citados anteriormente: a regeneração química.

A regeneração mecânica tem como objetivo reduzir o tamanho dos torrões (aglomerado de grãos de areia provenientes da etapa de desmoldagem, que ainda permanece coeso) e reduzir as camadas de aglomerante dos grãos de areia, através do atrito entre estes grãos, ou ainda entre estes e partes do equipamento (OLIVEIRA, 2007).

A regeneração térmica é geralmente realizada em um dos seguintes tipos de equipamentos: fornos de leito fluidizado ou fornos rotativos. Os fornos de leito fluidizado são equipamentos baseados na suspensão de um agregado por um fluxo de ar até que este

assuma algumas das características de um fluido. Os fornos rotativos são equipamentos que podem sofrer aquecimento indireto ou direto. Nos equipamentos de aquecimento indireto, a areia a calcinar é alimentada na extremidade mais alta de um tubo rotativo ligeiramente inclinado, feito de aço resistente ao calor. Nos sistemas com aquecimento direto, o queimador de gás ou óleo está disposto axialmente na mesma extremidade em que a areia a regenerar é alimentada. (MARIOTTO, 2001).

Na regeneração úmida, para dissolver o aglomerante, é necessária a agitação de uma suspensão de areia em água. Esse aglomerante é composto por substâncias hidrofílicas, como a bentonita na areia verde, ou solúveis em água, como o silicato de sódio. O processo a úmido é o método mais eficaz para a limpeza dos excedentes de areia, porém, as vezes pode exigir alto custo de investimento (OLIVEIRA, 2007).

A regeneração química da areia proveniente da etapa do processo de desmoldagem é realizado através do Processo de Oxidação Avançado, também conhecido como Processo Fenton. Neste processo é utilizada uma mistura de peróxido de hidrogênio e um íon ferroso, que gera radicais hidroxil altamente reativos que destroem a matéria orgânica (SCHEUNEMANN, 2005).

3.4 UTILIZAÇÃO DO SOLO NO CONTEXTO DA ENGENHARIA CIVIL

A obtenção de materiais com características físicas e mecânicas adequadas para fins estruturais em pavimentação e que resultem em baixos custos e de baixo impacto ambiental é uma tarefa difícil. Devido à essa dificuldade, a utilização dos solos locais passa a ser uma alternativa interessante.

Desde épocas antigas o solo tem sido utilizado pela humanidade, sendo utilizado como matéria-prima para a produção de cerâmicas, como tijolos, pisos e aparelhos sanitários, e também sendo utilizado como material de construção ou suporte para as fundações. É amplamente utilizado em diversos tipos de construções, como barragens de terra, aterros, fundações, camadas subjacentes aos pavimentos de rodovias (PINTO, 2006).

Ainda segundo Pinto (2006), em 1936 Karl Terzaghi estudou o comportamento dos solos, dando origem à Mecânica dos Solos. Desde então, o solo é amplamente estudado. Com o aumento do tamanho das edificações e obras de infraestrutura devido à expansão das cidades, o conhecimento geotécnico é extremamente importante para garantir a estabilidade de qualquer obra.

Como exemplo da importância de ter um bom conhecimento do terreno, Caputo (1998) comenta sobre as rodovias que cobrem grandes áreas, sendo muitas delas com características variadas. O autor ressalta que nesse tipo de obra é de extrema importância ter um controle rigoroso, fazendo a coleta de amostras e realizando ensaios laboratoriais, possibilitando assim o emprego das técnicas de execução mais adequadas para cada terreno.

Os solos são classificados de acordo com a sua utilização, e para isso são utilizadas suas características físicas, químicas e geológicas. Ainda segundo Caputo (1998), a partir do momento em que se começou a utilizar o solo em uma escala maior para as obras viárias, houve a necessidade de criar sistemas de classificação de solos, levando-se em consideração algumas de suas características físicas principais.

De acordo com Santos (2004), tem-se despertado o interesse pela utilização de solos lateríticos argilosos para o uso em bases e sub-bases de pavimentos. O autor cita algumas características desses materiais que os tornam interessantes para o uso em pavimentação de baixo custo, tais como valores de limites de liquidez entre 40 e 50% e índice de plasticidade entre 10 e 20%.

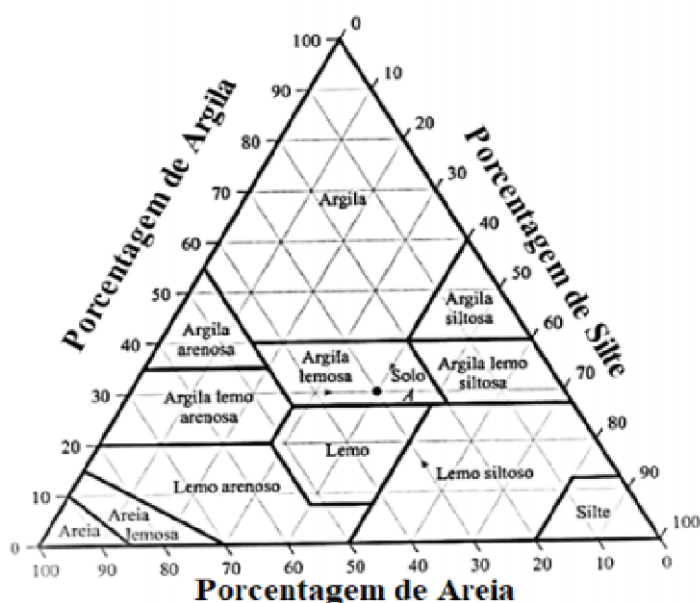
Pode-se constatar que o esforço de entender o comportamento desses solos quanto as suas propriedades naturais ou em relação à sua estabilização química, é uma alternativa de melhoramento das características de resistência e deformabilidade, ampliando seu uso em obras geotécnicas em geral.

3.5 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

Os solos são classificados em grupos e subgrupos, tendo como base a distribuição granulométrica e a plasticidade. Os sistemas de classificação são agrupados em duas principais categorias: a textural e comportamento de solo (ALMEIDA, 2012).

A classificação textural refere-se à aparência da superfície, onde a textura é influenciada pelo tamanho das partículas presentes no solo. Os solos são nomeados de acordo com os principais componentes (argila arenosa, argila siltosa, etc) nesse sistema de classificação. Foi desenvolvida uma quantidade de sistemas de classificação textural, e um deles é o sistema de classificação textural desenvolvido pelo Natural Resources Conservation Service (USDA), que tem como base os limites percentuais das partículas, conforme consta na Figura 3 (DAS e SOBHAN, 2015).

Figura 3 – Classificação Textural do Natural Resources Conservation Service (USDA)



Fonte: Das e Sobhan, 2015.

A classificação de acordo com o comportamento do solo está baseada na distribuição das partículas, mas também considera a plasticidade. Os sistemas associados a esse tipo de classificação são o sistema de classificação American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)/Highway Research Board (HRB)/Transportation Research Board (TRB) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (ALMEIDA, 2012).

Esta classificação tem sido aplicada no reconhecimento de solos para construção de pavimentos rodoviários. Os solos são separados em grupos e subgrupos em um quadro classificatório (Quadro 1), a partir de um processo de eliminação que ocorre do lado esquerdo para o lado direito, sendo que o primeiro grupo, a partir do lado esquerdo, com o qual os valores coincidirem, definirá a classificação correta (CASTRO, 2017).

Quadro 1 – Classificação HRB.

Classificação Geral	SOLOS GRANULARES (P200 < 35 %)							SOLOS SILTO-ARGILOSOS (P200 > 35%)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
P10	< 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P40	< 30	< 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-
P200	< 15	< 25	< 10	< 35	< 35	< 35	< 35	> 35	> 35	> 35	> 35
LL	-	-	-	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40
IP	< 6	< 6	NP	< 10	< 10	> 10	> 10	< 10	< 10	> 10	> 10
Índice de grupo (IG)	0	0	0	0	0	< 4	< 4	< 8	< 12	< 16	< 20
Tipos de material	Fragmentos de pedra, pedregulho e areia		areia fina	Pedregulhos e areias siltosas ou argilas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Classificação como subleito	Excelente a bom						Regular a mau				
Podemos acrescentar à estes o tipo A-8:solos orgânicos/turfas, imprestáveis como bases de pavimentos											

Fonte: Campos, 2006.

Os solos são divididos em sete grupos, de acordo com sua granulometria, índices de consistência e índice de grupo. Segundo Santos (2006), a subdivisão dos grupos ocorre da seguinte forma:

- Grupo A-1: são misturas bem graduadas com fragmentos de rocha e pedregulho, areia grossa, areia média e areia fina, com ou sem a presença de material fino, sendo pouco plásticos ou não plásticos;
- Grupo A-1-a: inclui os materiais constituídos de fragmentos de rocha ou pedregulho com ou sem material fino bem graduado;
- Grupo A-1-b: inclui materiais de predomínio de areia grossa a média, com ou sem material fino bem graduado;
- Grupo A-3: inclui as areias finas, com ausência de material siltoso ou argiloso;
- Grupo A-2: inclui uma grande variedade de materiais granulares;
- Grupo A-2-4 e A-2-5: é o grupo dos materiais granulares cuja fração passante na peneira nº 40 apresentou características dos grupos A-4 e A-5, incluindo também pedregulhos cuja porcentagem de silte e valores de índice de plasticidade forem acima dos valores do grupo A-1;
- Grupo A-2-6 e A-2-7: inclui os materiais semelhantes aos dos subgrupos A-2-4 e A-2-5;
- Grupo A-4: reúne solos siltosos não plásticos ou moderadamente plásticos;
- Grupo A-5: reúne os materiais semelhantes aos do Grupo A-4, podendo ser altamente elástico;

- Grupo A-6: apresenta solos argilosos plásticos;
- Grupo A-7: inclui materiais semelhantes aos do Grupo A-6, porém mais elásticos e com valores mais elevados de limite de liquidez;
- Subgrupo A-7-5: apresenta solos que possuem moderados índices de plasticidade, podendo ser altamente elásticos;
- Subgrupo A-7-6: inclui os materiais que possuem alto índice de plasticidade.

De acordo com Vendruscolo (2015), a nomenclatura de classificação dos subgrupos citados anteriormente pode ser observada no Quadro 2.

Quadro 2 – Nomenclatura de Classificação do Sistema HRB.

Grupo	Nomenclatura
A-1	Solos granulares sem finos
A-2	Solos granulares com finos
A-2-4	Solos finos siltosos de baixa compressibilidade
A-2-5	Solos finos siltosos de alta compressibilidade
A-2-6	Solos finos argilosos de média plasticidade
A-2-7	Solos finos argilosos de alta plasticidade
A-3	Areias Finas
A-4	Solos siltosos de baixa compressibilidade
A-5	Solos siltosos de alta compressibilidade
A-6	Solos argilosos de baixa compressibilidade
A-7	Solos argilosos de alta compressibilidade
A-7-5	Solos argilosos de alta compressibilidade, se $IP \leq (LL - 30)$
A-7-6	Solos argilosos de alta compressibilidade, se $IP > (LL - 30)$

Fonte: adaptado de Vendruscolo, 2015.

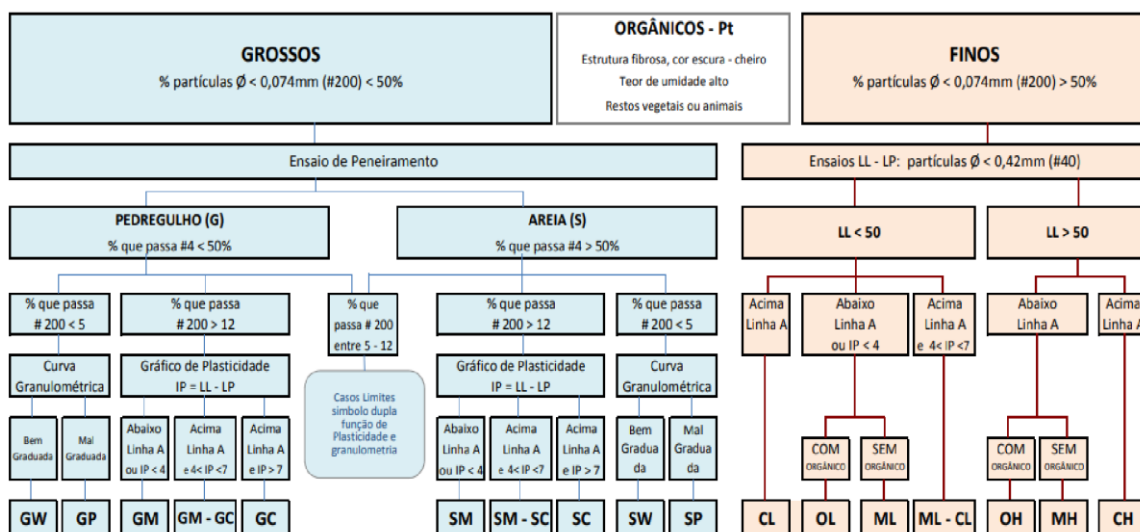
O Sistema Unificado de Classificação (SUCS), classifica os solos em três grandes grupos (CAPUTO, 1998):

- Solos grossos: aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é maior que 0,074 mm (mais que 50% em peso, dos seus grãos, são retidos na peneira nº 200), estando presentes os pedregulhos, areias e solos pedregulhosos ou arenosos com pequenas quantidades de silte ou argila;

- Solos finos: aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é menor que 0,074 mm, estando presentes os solos finos, siltosos ou argilosos, podendo estes serem de baixa ou alta compressibilidade;
- Turfas: solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares e extremamente compressíveis, que são representados pelo símbolo “Pt”.

O quadro com a classificação SUCS pode ser conferido a seguir (Quadro 3).

Quadro 3 – Classificação SUCS.



Fonte: UDESC, 2017.

Ainda segundo Caputo (1998), neste sistema todos os solos são identificados pelo conjunto de letras que representam as iniciais das palavras em inglês, cuja terminologia está apresentada no Quadro 4

Quadro 4 – Terminologia do Sistema Unificado.

(continua)

Símbolo	Terminologia
G de <i>gravel</i>	Pedregulho
S de <i>sand</i>	Areia
C de <i>clay</i>	Argila
W de <i>well graded</i>	Bem graduado
P de <i>poorly graded</i>	Mal graduado

(continuação)

M da palavra sueca <i>mo</i>	Silte
O de <i>organic</i>	Solo orgânico
L de <i>low</i>	Baixa compressibilidade
H de <i>high</i>	Alta compressibilidade
Pt de <i>peat</i>	Turfas

Fonte: Caputo, 1998 e elaborado pela autora, 2018.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Para caracterizar um solo, devem ser realizados estudos das partículas que o constitui. Sendo assim, são empregados alguns tipos de ensaios, como: umidade natural do solo; densidade real dos grãos; índices de consistência, também chamados de Limites de Atterberg; e curva granulométrica (PINTO, 2006).

3.6.1 Umidade Natural e Densidade Real dos Grãos

A umidade natural entende-se pela umidade do solo na forma em que ele se encontra na natureza. Para definir o teor de umidade, é necessário retirar uma amostra qualquer de solo para calcular a razão entre o peso da água nela existente e o peso do solo seco, que é expresso em porcentagem. Já a densidade real dos grãos é definida como a relação entre o peso e o volume de uma partícula individual de solo, expressa em g.cm⁻³ ou mg.m⁻³ (KORMANN, 1997).

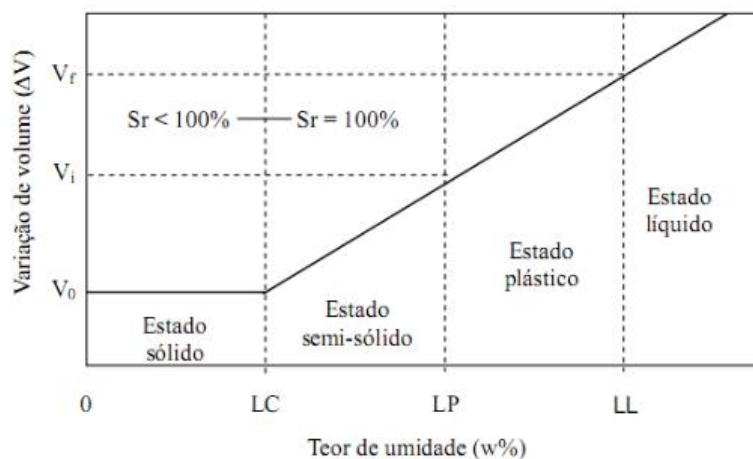
3.6.2 Limites de Atterberg

A consistência do solo determina o seu comportamento diante de determinadas tensões e deformações. Em 1911, o cientista sueco A. Atterberg definiu certos limites que delimitam o intervalo de consistência do solo, denominados limites de liquidez e de plasticidade, sendo: líquidas, plásticas, semissólidas, e sólidas, na medida que o teor de umidade for reduzido (SOUZA, RAFULL e VIEIRA, 2000).

Em relação à transição dos estados básicos (sólido, semissólido, plástico e líquido), os Limites de Atterberg são classificados como: limite de contração (o teor de

umidade em que ocorre a passagem do estado sólido para o semi-sólido); limite de plasticidade (o teor de umidade no qual o solo passa do estado semi-sólido para o estado plástico); e limite de liquidez (o teor de umidade em que ocorre a transição do estado plástico para o estado líquido) (CASTRO, 2017). Tais estados podem ser observados na Figura 4.

Figura 4 – Limites de Atterberg



Fonte: Messi, 2012.

a) Limites de Contração (LC):

No Limite de Contração ocorre a passagem do estado sólido para o semi-sólido, e representa o menor teor de umidade abaixo do qual o solo argiloso não irá mais reduzir o seu volume, ou seja, mesmo que continue perdendo peso, o solo não se contrai (SANTOS, 2010).

Os ensaios de contração são analisados por meio da curva de contração e, por intermédio dela, é possível determinar o Limite de Contração, obtendo-se assim uma boa estimativa até que o teor de umidade do solo permaneça saturado (SILVA e FILHO, 2003).

b) Limites de Plasticidade (LP):

O Limite de Plasticidade representa o teor de umidade no qual o solo passa do estado semi-sólido para o estado plástico, ou seja, o solo começa a se apresentar como

um material “moldável”, deixando de ser um material “sólido”. No laboratório, o LP é definido como o teor de umidade em que o solo começa a se fraturar quando se tenta moldá-lo com um cilindro de dimensões 3 mm de diâmetro (KORMANN, 1997).

c) Limites de Liquidez (LL):

O Limite de Liquidez representa o processo no qual o solo passa a se comportar como um fluido viscoso, ou seja, representa a fronteira entre o “estado plástico” e o “estado líquido”. No laboratório, para se obter o LL, é necessário utilizar o Aparelho de Casagrande, que se trata de um equipamento em forma de concha. O ensaio baseia-se na determinação do número de golpes necessários para fechar um sulco padrão efetuado no solo e colocado na concha, sendo esse realizado várias vezes, fazendo com que o teor de umidade da amostra varie. O LL corresponde à umidade que determina o fechamento do sulco com 25 golpes (KORMANN, 1997).

3.6.3 Curva Granulométrica

A granulometria do solo se trata da distribuição de suas partículas constituintes, de natureza inorgânica (ou mineral) em classes de tamanho, sendo essa também chamadas de frações granulométricas. A granulometria do solo é determinada a partir da análise granulométrica, e representa uma de suas características mais estáveis (FÍSICA DO SOLO, 2015).

De acordo com a NBR 6502/1995 da ABNT, a curva granulométrica é uma representação gráfica da distribuição granulométrica do solo, onde no eixo das abscissas é representado o tamanho das partículas, de ordem crescente para o lado direito, em escala logarítmica e no eixo das ordenadas é representada a porcentagem acumulada de solo seco em relação à massa total seca.

Segundo Faganello (2006), através da análise granulométrica são comparadas a curva granulométrica do solo em estudo com uma escala granulométrica adotada, podendo verificar se o solo é “bem graduado”.

A análise granulométrica consiste em duas etapas: peneiramento e sedimentação. Para realizar essa análise, é necessário submeter uma amostra de solo ao peneiramento por uma série padronizada de peneiras, onde o peso do material que passa em cada peneira

é representado graficamente em função da abertura da peneira (MANUAL TÉCNICO, 2009).

A classificação das partículas segundo seus diâmetros equivalentes, de acordo com a escala granulométrica da NBR 6502/1995 pode ser observada no Quadro 5.

Quadro 5 – Escala Granulométrica de acordo com a NBR 6502/1995 da ABNT.

Fração	Limites (mm)
Matacão	1000 – 200
Pedra-de-mão	200 – 60
Pedregulho	60 – 2
Areia Grossa	2,00 – 0,60
Areia Média	0,60 – 0,20
Areia Fina	0,20 – 0,06
Silte	0,06 – 0,002
Argila	< 0,002

Fonte: Romanini, 2017 e elaborado pela autora, 2018.

3.7 COMPACTAÇÃO DO SOLO

A compactação é um método cujo processo é manual ou mecânico, que visa estabilizar e reduzir o volume de vazios do solo, tendo como objetivo aumentar a intimidade de contato entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo. A compactação visa melhorar as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade do solo, sendo muito importante em obras geotécnicas (TORRES GEOTECNIA, 2017).

A compactação de solos é de fundamental importância para inúmeras obras de engenharia civil, como para aterros de barragens, de rodovias, de ferrovias, de dutovias, camadas de pavimentos rodoviários, solos de apoio de fundações diretas, terraplenos de muros de arrimo, reaterros de valas escavadas, retaludamentos de encostas naturais, bermas de equilíbrio e aterros de regularização. Em todas essas obras é necessário que se atinja graus de compactação tecnicamente aceitáveis, definidos a partir de resultados de ensaios realizados em laboratório (TRINDADE et al., 2008).

O teor de umidade tem grande influência no processo de compactação do solo e favorece a obtenção de valor máximo de densidade, ou seja, de compactação. Outro fato

importante a notar é que, à medida que a energia de compactação aumenta, é necessária uma quantidade menor de água para se alcançar o máximo de compactação (MANTOVANI, 1987).

De acordo com Lima (2013), quando a compactação é realizada com umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma redução significativa dos vazios. Já quando realizada com umidades mais elevadas, a água provoca um efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto.

Porém, a partir de certo ponto, o grau de saturação torna-se muito elevado e a compactação não consegue expulsar o ar existente nos vazios, que se encontra em forma de bolhas oclusas. Dessa forma, não é possível atingir a saturação plena do corpo de prova apenas pelo processo de compactação. Para cada energia de compactação aplicada, um certo teor de umidade conduz a uma massa específica máxima, este que é denominado como teor de umidade ótima. (MANTOVANI, 1987).

Assim, a ABNT padronizou o Ensaio Proctor pela NBR 7182/1986, e a partir deste pode-se observar que a aplicação de uma maior energia de compactação provoca um aumento da densidade seca quando o solo se encontra com uma umidade abaixo da ótima. Já quando a umidade está acima da umidade ótima, o esforço da compactação é quase indiferente no aumento da densidade, pois não se consegue expelir o ar dos vazios (PINTO, 2006).

Torres Geotecnia (2017) ressalta que os solos não devem ser compactados abaixo da umidade ótima, pois ela corresponde à umidade que fornece estabilidade ao solo. Caso o solo fosse compactado com umidade inferior à ótima, ele iria apresentar resistência superior àquela obtida quando da compactação no teor de umidade ótimo. Contudo, este solo poderia vir a saturar em campo (em virtude do período de fortes chuvas), vindo alcançar uma umidade correspondente à curva de saturação do solo, para o qual o solo apresenta valor de resistência praticamente nulo.

Outra variável a ser considerada no processo de compactação é a textura do solo. Os solos, cuja constituição seja de partículas do mesmo tamanho, são menos susceptíveis ao processo de compactação, comparados àqueles onde há mistura de argila, silte e areia (MANTOVANI, 1987).

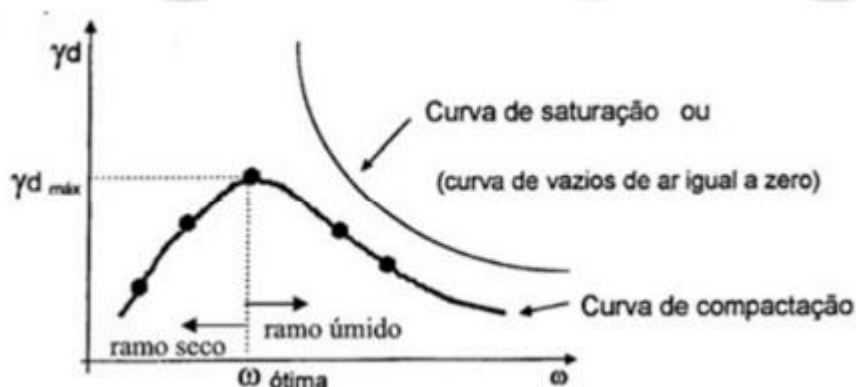
Em solos mais grosseiros o teor de água ótimo é menor, já solos com predomínio de argila o teor de umidade ótimo é mais elevado. Assim, pode-se observar que solos argilosos são formados por grãos pequenos e compactos, o que facilita a melhor

compactação quando nas condições ideais. No caso dos solos arenosos, por serem muito permeáveis, a água infiltra facilmente pelos espaços formados entre os grãos, sendo mais difícil obter uma compactação eficaz (SANTOS, 2008).

Cada ensaio de compactação é aplicado em áreas distintas. O ensaio com o Proctor Normal é recomendado para a obtenção do valor da umidade ótima para pequenas obras de terra e que serão compactadas por equipamentos leves. O Ensaio de Proctor Modificado é recomendado para a obtenção do valor da umidade ótima para grandes obras de terra e que serão compactadas por equipamentos pesados. E, por fim, o Ensaio de Proctor Intermediário é recomendado para a obtenção do valor da umidade ótima para obras de terra compactada e equipamentos de médio porte (FILHO e CARVALHO, 2003).

Na Figura 5 pode-se observar o comportamento do solo ao se realizar a compactação, por uma mesma energia de compactação para diferentes valores de umidade.

Figura 5 – Curvas de compactação



Fonte: Antas, 2016.

As formas pela qual a energia de compactação pode ser transmitida ao solo são por pressão, impacto ou vibração. Os equipamentos utilizados são cilindros estáticos, cilindros vibradores e equipamentos de percussão. O número de passagens do compactador, a espessura da camada compactada e as características do equipamento utilizado também são fatores que influenciam na compactação (SANTOS, 2008).

3.8 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A resistência mecânica é a força resultante da aplicação de uma força sobre um material, que depende da sua capacidade de suportar uma carga sem apresentar deformações ou falhas. Quando a força é aplicada, ocorre a deformação de um corpo, que tende a alterar a sua forma e dimensão, podendo ser visível a olho nu como imperceptíveis sem a utilização de equipamentos de precisão (ALMEIDA, 2012).

O desenvolvimento e ensaio de resistência à compressão simples é de fundamental importância, esse que é executado com frequência e está presente em grande parte das pesquisas relacionadas ao tema, além de ser de fácil realização, fazendo com que seja de fácil comparação (KLEINERT, 2016).

Os ensaios de resistência à compressão simples são utilizados principalmente para a determinação da relação entre a tensão e a deformação. Para isso, se faz necessária a confecção de corpos-de prova padronizados para a execução dos ensaios. Um dos cuidados a serem adotados na realização do ensaio é o dimensionamento da amostra, que deve ter uma relação entre o comprimento e a seção transversal adequada para resistir à flexão e a flambagem (ALMEIDA, 2012).

O ensaio de compressão simples pode ser executado de duas maneiras: por deformação controlada, controlando a velocidade de deformação do corpo de prova e medindo a carga aplicada correspondente; ou por carga controlada, controlando a carga aplicada ao corpo de prova e medindo a deformação correspondente (KRAINER, 2016).

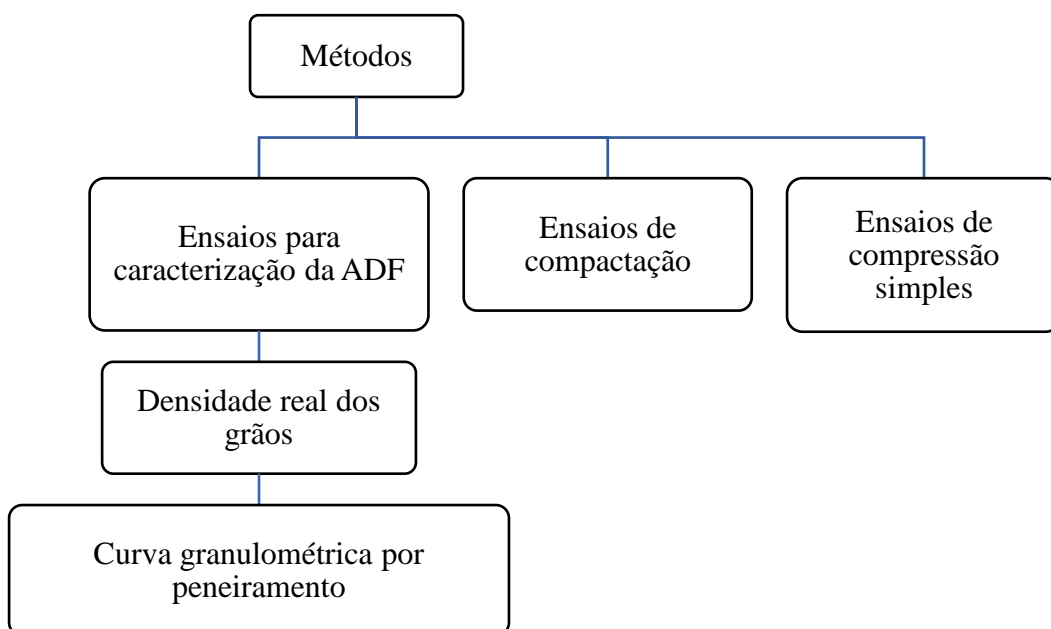
Em geral, as deformações de um corpo não são uniformes ao longo do seu volume, e as mudanças na geometria de um segmento de linha sobre o corpo podem variar ao longo do seu comprimento. A partir dos dados de tensão e deformação obtidos nos ensaios é possível construir um gráfico, onde a curva resultante é chamada de diagrama tensão-deformação. Através dele, obtêm-se os dados da resistência à compressão de um material independente da sua geometria. A partir da curva tensão-deformação podem-se identificar as diferentes formas do comportamento do material, dependendo da deformação específica a ele imposta (ALMEIDA, 2012).

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental baseia-se em três etapas. Na primeira etapa, serão realizados ensaios para caracterização da ADF utilizada. Na segunda etapa, serão realizados ensaios de compactação, utilizando diferentes porcentagens de solo e de ADF. Na terceira e última etapa, serão realizados ensaios de compressão simples, utilizando as mesmas porcentagens de materiais da segunda etapa. A Figura 6 apresenta as etapas do programa experimental.

Figura 6 – Fluxograma dos métodos utilizados no estudo



Fonte: elaborado pela autora, 2018.

4.2 MATERIAIS

4.2.1 Solo

As amostras de solo para o presente estudo foram coletadas no território da Universidade Federal da Fronteira Sul, localizada no município de Cerro Largo – RS. Este município localiza-se no Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, na Região das

Missões, e está situado na latitude $-28^{\circ}08'30,76928''$ e longitude $-54^{\circ}45'17,13341''$ (IBGE, 2014). A coleta do material foi realizada atrás do RU (Restaurante Universitário). Na Figura 7, podemos observar amostras do solo utilizado.

Figura 7 – Amostras do solo dispostas em bandejas



Fonte: Castro, 2017.

De acordo com os estudos realizados por Castro (2017), esse solo é classificado como Grupo A-7-5 – Solos Argilosos de Alta Compressibilidade, ou seja, é um solo silto-argiloso que possui moderados índices de plasticidade, podendo ser altamente elástico, possuindo um comportamento de regular a mau. Além disso, foram realizados outros ensaios para a caracterização deste solo, entre eles: a umidade ótima, onde obteve-se 37,07%; a densidade real dos grãos, onde obteve-se $26,2 \text{ kN.m}^{-3}$, sendo que o valor estabelecido para solos comuns varia de $23,0$ a $29,0 \text{ kN.m}^{-3}$; e o Índice de Plasticidade, obtendo-se como resultado 11,83.

4.2.2 Areia de fundição (ADF)

A ADF utilizada ao longo da pesquisa foi obtida da empresa de fundição A. J. Borghetti Fundição e Usinagem, situada em Cerro Largo – RS, onde o tipo de areia residual gerada é a areia de fundição verde, e está ilustrada na Figura 8. De acordo com parâmetros analisados por ensaios laboratoriais, a areia é classificada como resíduo não-inerte – Classe II A.

Figura 8 – Areia verde de fundição



Fonte: elaborado pela autora, 2018.

4.2.3 Água

A água utilizada para os ensaios de compactação e compressão simples foi a água fornecida pela CORSAN – Cerro Largo/RS.

4.3 MÉTODOS

4.3.1 Métodos para a caracterização da ADF

a) Densidade real dos grãos:

Para a realização do ensaio para determinar a densidade real dos grãos, seguiu-se os procedimentos descritos pelo “Manual de Métodos e Análises do Solo” da Embrapa, 2011.

b) Granulometria por peneiramento:

Para a realização deste ensaio, seguiram-se os procedimentos descritos pela Norma NBR 7181/1984 da ABNT, de forma a determinar as dimensões das partículas da ADF e das proporções relativas em que elas se encontram. Foram utilizadas peneiras de 1”, ¾”, ½”, 3/8”, n° 4, n° 8, n° 10, n° 30, n° 40, n° 50, n° 100 e n° 200.

4.3.2 Ensaio de compactação

Na Tabela 2, está ilustrado como ocorrerão os ensaios de compactação.

Tabela 2 – Composição da amostra de solo e ADF

SOLO (%)	ADF (%)
100	0
65	35
50	50
35	65

Fonte: elaborado pela autora, 2018.

a) Ensaio de compactação do solo:

Os Ensaio de Compactação do solo foram realizados de acordo com a NBR 7182/1986 da ABNT, com o objetivo de obter o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima de cada mistura. Foram feitos em torno de 5 ensaios de compactação e, para cada ensaio realizado, utilizou-se cinco porcentagens diferentes de umidade (24%, 26%, 28%, 30% e 32%). Após a determinação das porcentagens de umidade, fez-se a mistura da água com o solo, para então fazer a compactação do solo em um cilindro com volume de 997,46 cm³ e 2374,09 g, utilizando um soquete. Depois de compactada, a amostra foi retirada do cilindro, com o auxílio de um extrator de amostras hidráulico (Figura 9). Pesou-se a amostra e, em seguida, retirou-se uma pequena parte dela para ficar na estufa por 24 horas, resultando posteriormente a sua umidade ótima.

Figura 9 – Cilindro para ensaios de compactação, soquete para ensaios de compactação e extrator hidráulico



Fonte: elaborado pela autora, 2018.

b) Ensaios de compactação do solo com areia de fundição:

Nesta etapa, foi utilizado o mesmo procedimento descrito no item a) Ensaios de compactação do solo. Porém, foi misturado solo, água e diferentes porcentagens de ADF (35%, 50% e 65%).

4.3.3 Ensaios de compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples seguiram os procedimentos da norma NBR 12025/2012 da ABNT e auxílio de equipamento de ensaio da marca SOLOTEST. As amostras foram moldadas em triplicata para cada dosagem, sendo a moldagem dos corpos de prova a serem utilizados para os ensaios em função dos parâmetros dos corpos de prova dos ensaios de compactação Proctor Normal, ou seja, massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo. Foram utilizados, para os ensaios de compressão simples, corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Durante a realização do ensaio, foram tomadas medidas do diâmetro e da altura de cada corpo de prova através de um paquímetro com precisão de centésimo de

milímetro. Este ensaio foi realizado através do rompimento dos corpos de prova, utilizando uma prensa hidráulica.

O corpo de prova foi colocado na prensa entre os discos, quando se teve início a aplicação de carga. Esta carga foi aplicada de forma contínua, com aumento de tensão média sobre o corpo de prova até que a ruptura do corpo de prova fosse alcançada. A carga foi obtida por intermédio de leituras no anel dinamométrico e as deformações através de leituras no defletômetro. Conforme a Figura 10, pode-se observar o aparelho utilizado para ensaio de compressão simples.

Figura 10 – Equipamento para ensaio de compressão simples



Fonte: elaborado pela autora, 2018.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para os ensaios de: densidade real dos grãos e curva granulométrica por peneiramento da ADF; compactação do solo; compactação do solo com ADF; e compressão simples do solo com ADF.

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ADF

5.1.1 Densidade real dos grãos

Os valores obtidos para o ensaio de densidade real dos grãos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Densidade real dos grãos

Densidade real dos grãos	
(g.cm -3)	
	2,4523
	2,4973
	2,5273
	2,3248
Valor	2,4504
médio	

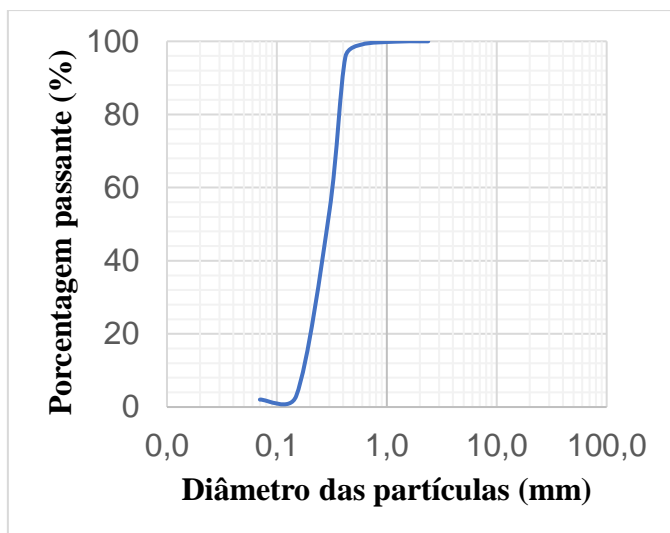
Fonte: elaborado pela autora, 2018.

Através da Tabela 3, pode-se perceber que o valor médio de densidade real dos grãos ficou em 2,4504 g.cm -3.

5.1.2 Granulometria por peneiramento

O resultado referente ao ensaio de granulometria está apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Curva Granulométrica por peneiramento



Fonte: elaborado pela autora, 2018.

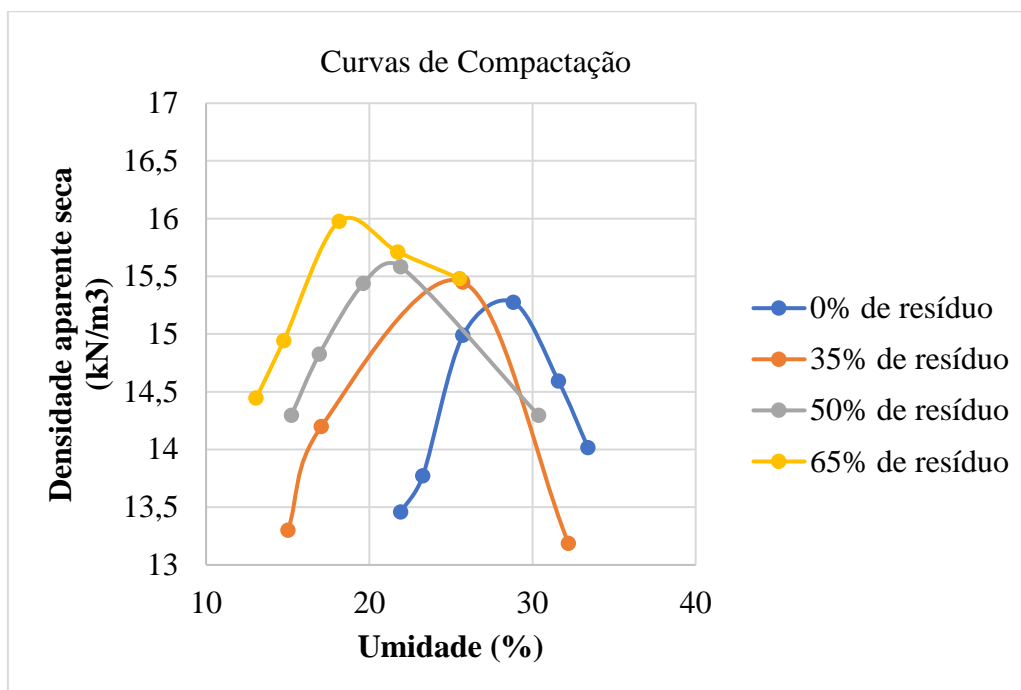
Através da Figura 11, pode-se perceber que a areia é constituída de 52,4% de areia fina, 47,5% de areia média e 0,10% de areia grossa, apresentando granulometria característica de agregado miúdo, com curva granulométrica localizada entre as faixas de areia fina e areia média na curva granulométrica.

A porcentagem passante é aquela que passou em cada peneira, referindo-se ao peso seco da amostra. A porcentagem retida é aquela parcela que ficou retida numa determinada peneira. Esse percentual foi obtido quando se conheceu o peso seco da amostra, depois pesou-se o material retido, dividiu-se este pelo peso seco total e multiplicou-se por 100.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Os Ensaio de Compactação foram realizados de acordo com a NBR 12025/1992 da ABNT, com o objetivo de obter o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima de cada mistura. As curvas de compactação podem ser observadas nas Figura 12.

Figura 12 – Curvas de compactação



Fonte: elaborado pela autora, 2018.

Os dados da Figura 12 podem ser observados na Tabela 8. Observou-se que, com o aumento da adição de resíduo, houve um aumento do peso específico, e quanto mais pesado, mais compacto será o material e isto terá influência positiva na resistência à compressão simples e na absorção de umidade. Observou-se também que a adição do resíduo em estudo reduziu o valor da umidade ótima, sendo isto positivo para as propriedades do solo.

Neste ensaio, determina-se a umidade ótima de compactação onde a resistência seria maior devido à máxima compactação do material.

Tabela 4 – Umidade ótima e peso específico ótimo

% Resíduo	Umidade Ótima (%)	Peso Específico
		Aparente Seco Máximo (kN/m ³)
0	28,82	15,28
35	25,74	15,45
50	21,92	15,58
65	18,16	15,98

Fonte: elaborado pela autora, 2018.

Analisando a Tabela 4, foi possível concluir que houve um aumento do peso específico aparente seco máximo conforme se aumentou o teor de resíduo na mistura. Notou-se também que à medida que se aumenta o teor de resíduo na mistura, a umidade ótima tende a diminuir. Isso ocorre pelo fato de que a ADF tem uma superfície específica menor que a do solo, sendo assim, as misturas com maior quantidade de solo absorvem mais água do que as misturas com maior quantidade de ADF.

5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Para os ensaios de resistência à compressão simples, gerou-se um gráfico representativo para o solo e para as misturas de solo-resíduo, estas que podem ser observadas pelas Figuras 13 a 16.

Figura 13 – Curva de resistência a compressão simples para 0% ADF

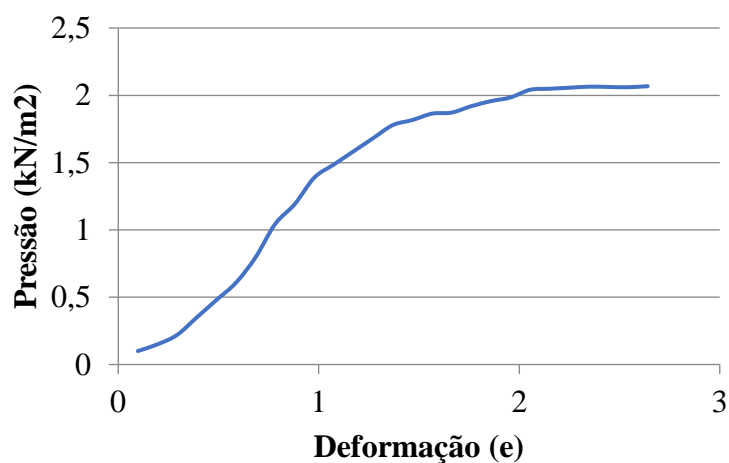


Figura 14 – Curva de resistência a compressão simples para 35% ADF

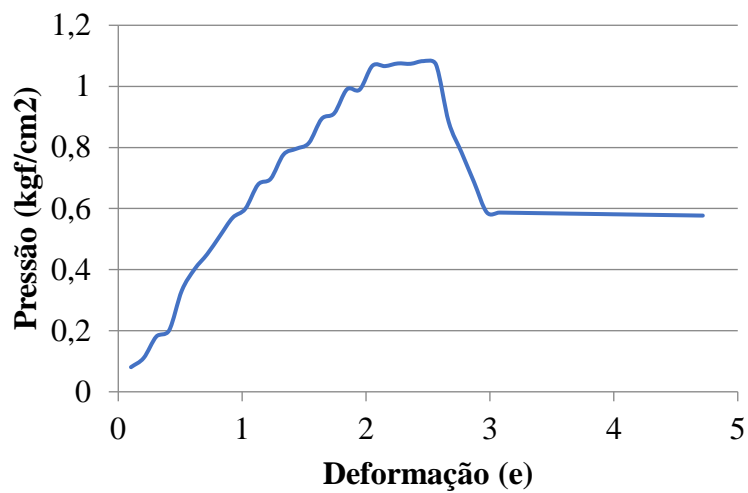


Figura 15 – Curva de resistência a compressão simples para 50% ADF

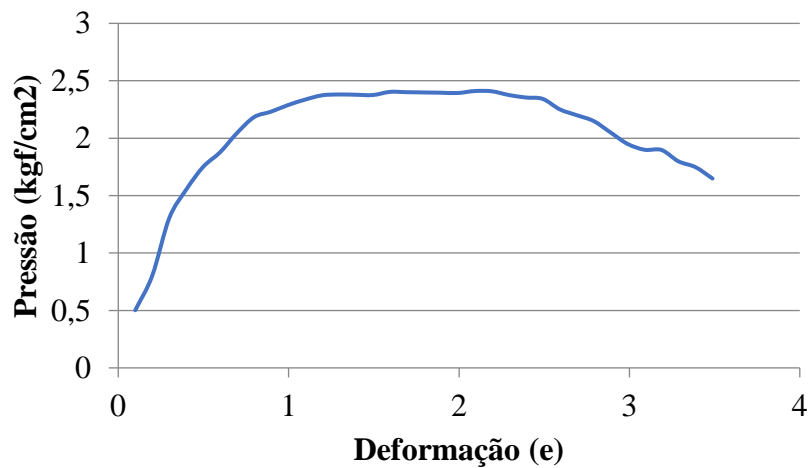
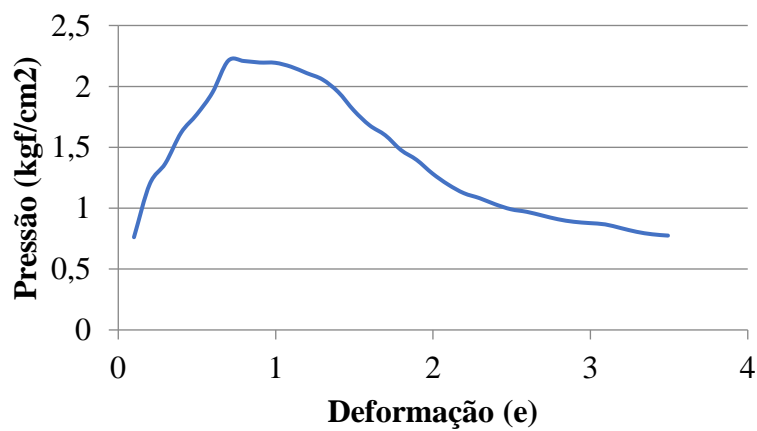


Figura 16 – Curva de resistência a compressão simples para 65% ADF



Na Tabela 5 a seguir, podemos observar os valores máximos de tensão para porcentagem de resíduo, bem como a média desses valores.

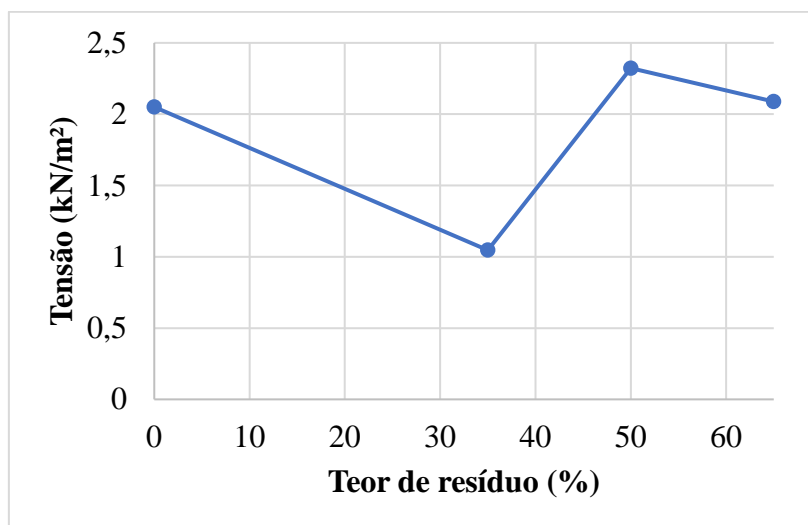
Tabela 5 – Valores máximos de tensão e suas respectivas médias

Teor de resíduo (%)	Tensão 1 (kN/m ²)	Tensão 2 (kN/m ²)	Tensão 3 (kN/m ²)	Média (kN/m ²)
0	1,882929841	2,067754994	2,197533658	2,0494061643
35	1,082649842	0,854596249	1,201530812	1,0462589477
50	2,004120624	2,4109586	2,5526862	2,3225884747
65	1,3952026	2,6600192	2,2103671	2,0885296333

Fonte: elaborada pela autora, 2018.

Já na Figura 17 a seguir, podemos observar em um gráfico os valores médios de tensão para cada porcentagem de resíduo.

Figura 17 – Curva de resistência a compressão simples para 0, 35, 50 e 65% ADF



Fonte: elaborado pela autora, 2018.

A partir dos resultados determinados pelo ensaio de compressão simples, percebeu-se que a pressão suportada para a mistura de solo pura foi de 2,05 kgf/cm², para a mistura de 35% de solo-resíduo 1,05 kgf/cm², 50% de 2,32 kgf/cm² e 65% de 2,08 kgf/cm² consecutivamente.

A máxima resistência à compressão simples foi atingida para o material com adição de 50% de resíduo. Já a mínima resistência se deu na adição de 35% de resíduo,

resultando em um valor contraditório em relação ao esperado. De acordo com Silva e Pereira (2017), para entender este comportamento são necessários ensaios sobre as alterações microestruturais destas misturas.

Alguns dos resultados determinados pelo ensaio de compressão simples são função da umidade do material. Para alguns tipos de solo, a velocidade de deformação do corpo de prova também pode ser maior. Para os solos classificados como moles, apresentou-se grande deformação sob a aplicação de carga, e uma pequena deformação para solos duros e quebradiços (PIVETTA, 2017).

Alguns problemas foram encontrados para a realização dos ensaios, como por exemplo, a impossibilidade de controle da umidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa serviram como parâmetro para a combinação da areia de fundição com solo argiloso compactado, de forma a compor um novo material que possa ser utilizado como base e sub-bases de pavimentos, e como cobertura final para aterros sanitários. Isso favorece o meio ambiente de várias maneiras, evitando-se a disposição inadequada desse resíduo em aterros e a exploração desnecessária de recursos naturais adicionais.

Os ensaios de compactação do solo tiveram como objetivo aumentar a resistência do material, bem como reduzir a compressibilidade e permeabilidade, evitando assim possíveis incidentes em obras de grande escala, por exemplo.

Quanto à compressão simples, os ensaios com 50% de solo-resíduo se mostraram bons quando comparados ao solo natural, mostrando que é possível introduzir teores de resíduo sem perder a qualidade.

Mesmo que não exista uma norma que estabeleça um parâmetro de resistência para materiais utilizados em aterros sanitários, o solo e a areia de fundição apresentam boas características para o uso em camada de cobertura final para estes, pois, segundo Gomes, Moraes e Boff (2007), suas características permitem menor passagem de água.

O reuso da areia de fundição também pode se mostrar promissor como material de construção de camadas de pavimentos. De acordo com Klinsky e Fabbri (2009), a mistura de resíduo com solo argiloso poderia ser utilizada como material para construção de bases e sub-bases de pavimentos de baixo volume de tráfego, uma vez que elas atendem às exigências estabelecidas na especificação ET-DE-P00-015A do DER-SP (2005), Sub-Base ou Base de Solo Arenoso Fino de Comportamento Laterítico – SAFL.

Concluiu-se que as características do solo natural são argilosas, já o resíduo apresenta granulometria característica de agregado miúdo. Os valores de compactação foram bons, pois conforme houve o aumento de porcentagem de resíduo, houve um aumento do peso específico, ficando dentro dos resultados esperados. Quanto à compressão simples, houve um aumento na resistência do material quando adicionada a areia de fundição, mostrando que é possível introduzir teores desse resíduo sem perder a qualidade. Porém, embora tenha mostrado uma melhor resistência, a viabilidade do uso desse material vai depender muito da localização das indústrias de fundição, para que assim o transporte deste tipo de material não se torne um empecilho na análise financeira.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTAS, A. M. **Compactação de solos**. 2016. Arquivo digital. Disponível em: < <http://slideplayer.com.br/slide/7776504/>> Acesso em: 03 de Julho de 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS – ABETRE. **Gerenciamento de resíduos industriais: uma responsabilidade econômica e ambiental**. 2010. Disponível em: < www.abetre.org.br > Acesso em: 07 de Março de 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO – ABIFA. **Areias de Fundação de Ferro Descartadas: A Visão da ABIFA**. Revista Fundação e Matérias-primas. Edição 78, p. 54 – 61, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos. Sólidos. Rio de Janeiro, 1987. 63p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15702**: Areia descartada de fundição – Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro. ABNT, 8p., 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR. 7181**: Solo- Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984, 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986, 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solo Terminologia. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**. Solo cimento. Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos. 1986.
- BIOLO, S. M. **Reuso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos**. 2005.
- BONET, I. I. et al. **Valorização do resíduo areia de fundição (RAF): incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ**. 2002.
- BONIN, A. L., ROSSINI, A. J., ZABIM, A. F. P. **Reutilização de areia preta de fundição na construção civil**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Fundação - CONAF 95, ABIFA. Campinas, 1995.
- BRASIL, IBGE. **Cidades**, 2014. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/>> Acesso em 11 de Maio de 2018.
- CAMPOS, M. S. **Classificação dos Solos**. Geotecnia Ambiental, ano de 2006. Universidade de Várzea Grande. Arquivo Digital, disponível em: < <http://files.sena-solos-e-geologia.webnode.com/200000102->

cfed7d1de9/Aula%2006%20%20Classifica%C3%A7%C3%A3o%20dos%20solos.pdf>
Acesso em 10 de Maio de 2018.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição, 1998.

CARNIN, R. L. P. et al. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. 2008.

CASTRO, B. A. C. de. **Notas de aula: construção de estrada e vias urbanas**. Ano de 2015.

CASTRO, F. O. **Caracterização e determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade do solo da UFFS Campus Cerro Largo/Rs**. 2017.

CHEGATTI, S. et al. **Aplicação de resíduos de fundição em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmica**. 2004.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo, 2015.

DE ALMEIDA, S. M. **Análise do Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico do Concreto de Cimento Portland através de ensaios de Compressão Simples e de frequência ressonante**. 2012.

DE 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 MIRANDA, L. F. et al. Caracterização e reutilização de descarte de areias de moldagem utilizadas em fundição. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 14, n. 1, 2015.

DEMATTE, C. L. **Caracterização de bentonitas para fundição**. 1. ed. Sociesc - Sociedade Educacional de Santa Catarina. Centro de Ciências Tecnológicas. Joinville, 2000.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Manual de Métodos de Análises do Solo**. Rio de Janeiro, 2011. 255 p.

FAGANELLO, A. M. P. **Rejeitos de britagem de origem basáltica: caracterização e utilização em solo-cimento na região de Londrina (PR)**. Londrina, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina.

FILHO, J. A. P.; CARVALHO, D. **Compactação planejada**. Universidade Nove de Julho/SP. Unicamp. Revista Cultivar Máquinas, nº 21. Maio/Junho 2003.

FÍSICA DO SOLO. **Granulometria e Textura do Solo**. 2015. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/576877/mod_resource/content/1/Aula%201%20-%20Granulometria%20e%20Textura%20do%20Solo.pdf> Acesso em 03 de Maio de 2018.

GOMES, L. P.; MORAES, C. A. M.; BOFF, R. D. **Emprego de Areia Usada de Fundação em Coberturas Intermediária e Final de Aterros Sanitários de RSU**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 3, n. 4, p. 71, 2007.

JANSEN, C. S. **Aplicação da produção mais limpa como ferramenta para melhoria contínua do sistema de gestão de saúde, segurança e meio ambiente**. 2013.

KLEINERT, T. R. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem**. 2016. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KLINSKY, L. M. G.; FABBRI, G. T. P. Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos. **Diss. Mestrado. Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de S. Paulo**, v. 215, 2008.

KLINSKY, L. M. G.; FABBRI, G. T. P. **Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes, 2009.

KORMANN, A.C.M. **Ensaio de Compactação e Caracterização**. Curitiba, 1997.

KRAINER, C. W. M. **Noções de Resistência à Compressão, Ensaio de Compressão Simples e Diametral**. Ano de 2016. Arquivo Digital disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/c/ce/Aula_6_Resistencia.pdf> Acesso em 21 de Junho de 2018.

LIMA, A. P. Notas de aula: **Unidade 02 – Compactação dos solos**. Ano de 2013.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 1987.

MANUAL TÉCNICO: **Reforço de solos**. Editora Maccaferri, 2009. Disponível em: <http://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/maccaferri/manual_tecnico_reforco_de_solos.pdf> Acesso em 03 de Maio de 2018.

MARIOTTO, L. C. **Regeneração de Areias de Fundição**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, 2001.

MESSI, J. **Relatório Mecânica dos solos**. Ano de 2012. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAafbWIAF/relatorio-mec-dos-solos>> Acesso em 30 de Abril de 2018.

- MOREIRA, M. T. P. de O. et al. **Contaminação ambiental associada às areias residuais de fundição**. 2004.
- MORENO, D. A. A. C. et al. **Compactação do solo: efeitos benéficos e adversos da compactação e sua relação com a engenharia e agropecuária**. São Paulo, 2015.
- NETO, B. C.; FABBRI, G. T. P. **Avaliação da reutilização da areia de fundição em misturas asfálticas densas do tipo CAUQ**. TRANSPORTES, v. 12, n. 2, 2004.
- OLIVEIRA, G. V. **Aplicações potenciais para as areias descartadas de fundição: um estudo exploratório**. 2016.
- OLIVEIRA, J. C. D. de et al. **Estudo experimental da regeneração termica de areia de macharia em leito fluidizado**. 2007.
- OLIVEIRA, T. M. N. de et al. **Eco-estratégia empresarial no setor metal-mecânico da escola técnica Tupy**. 1998.
- PENKAITIS, G. **Impacto ambiental gerado pela disposição de areias de fundição: estudo de caso**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2012.
- PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355 p.
- PINTO, F. B. **O uso de areia descartada de fundição (ADF) na produção de concreto**. 2013.
- PIVETTA, C. P. **Utilização do resíduo de construção e demolição em solo compactado**. 2017.
- 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.
- ROMANINI, Eng Civil A. **Campus de Sinop Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologias Curso de Engenharia Civil Geotecnia III**. Ano de 2017. Disponível em: < http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_13964aula_03_-_pdf_Aula_03_.pdf > Acesso em 03 de Maio de 2018.
- ROSSETTO, T. S. **Caracterização de areias descartadas de fundição com diferentes teores de bentonita**. 2010.
- SANTOS, A. C. S. dos. **Mecânica dos solos I- Tópicos complementares**. Mato Grosso, 2010. Arquivo Digital disponível em: < http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_5203mini-cuyso_-_typico_2_-_plasticidade_e_consistyncia_pdf.pdf > Acesso em 30 de Abril de 2018.
- SANTOS, A. V. dos et al. **Reaproveitamento de areia de fundição descartada em substituição da areia natural na fabricação de blocos estruturais de concreto**. 2016.

SANTOS, E. F. dos. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. São Carlos, 2006.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

SANTOS, J. A. **Compactação.** Elementos Teóricos. Instituto Superior Técnico, Fevereiro de 2008.

SANTOS, J. dos. **Estabilização de uma argila laterítica do Distrito Federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego.** Brasília, 2004. 109 p. Dissertação (mestrado em Construção Civil). Universidade de Brasília.

SCHEUNEMANN, R. et al. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton.** 2005.

SILVA, D. R.; FILHO, W. L. de O. **Estudos experimentais do processo de ressecamento de um rejeito fino de mineração.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 56(4): 261-265, out. dez. 2003.

SILVA, K. D. da. **Reutilização do resíduo de areia de fundição no Brasil e no mundo o contexto do estado de Minas Gerais.** 2010.

SILVA, VPA; PEREIRA, R. S. **Caracterização de misturas de solo e areia descartada de fundição.** São Paulo, 2017.

SOUZA, C. M. A. de; RAFULL L. Z. L.; VIEIRA, L. B. **Determinação do Limite de Liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, Campina Grande, v.4, n.3, p.460-464, 2000.

TEIXEIRA, I. et al. **Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento.** 2014.

TOLEDO, E. B. S. **Método de utilização de areia de fundição e resíduos de poeira de jateamento (microesferas de vidro) para produzir cerâmica vermelha.** 2006.

TORRES GEOTECNIA. Ensaio de compressão simples. Minas Gerais, 2017. Arquivo digital. Disponível em: < <http://www.torresgeotecnia.com.br/portfolio-view/ensaio-decompressao-simples/>> Acesso em 21 de Junho de 2018.

TRINDADE, T. P. da et al. **Compactação dos solos: fundamentos teóricos e práticos.** Viçosa: UFV, 2008. 95 p.

UDESC – UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Classificação de Solos SUCS.** Laboratório de geotecnia e pavimentação- Departamento de Engenharia Civil- Centro de Ciências Tecnológicas. Ano de 2017. Arquivo Digital disponível em: <http://www.cct.udesc.br/arquivos/id_submenu/1470/classificacao_sucs_2017.pdf> Acesso em 27 de Abril de 2018.

VENDRUSCOLO, M. A. **Notas de Aula: Classificação de Solos.** Ano de 2015.