

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC  
CENTRO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

Lucas Coelho dos Santos

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO ATRAVÉS DA  
INCORPORAÇÃO DE AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO RESIDUAL**

Joinville  
2015

Lucas Coelho dos Santos

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO ATRAVÉS DA  
INCORPORAÇÃO DE AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO RESIDUAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia.

Orientador: Prof. D.SC Marcelo Heidemann.

Joinville  
2015

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

DOS SANTOS, Lucas Coelho; DOS SANTOS, L.C.

Estudo da estabilização de um solo expansivo através da  
incorporação de areia verde de fundição residual. Trabalho de  
conclusão de curso.

Joinville, 2015, volume único, 80p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de  
Infraestrutura), Curso de Graduação em Engenharia de Infraestrutura,  
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM) – Campus Joinville  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2015.

Orientador: Prof. D.Sc Marcelo Heidemann.

Defesa: 03/12/2015

1. Solo expansivo. 2. Areia de fundição. 3. Estabilização de solos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela vida, força e fé que me fizeram chegar até aqui.

Aos meus pais, Abrahão H. T. dos Santos e Silvana C. dos Santos, por todo amor e carinho durante cada segundo da minha vida, sem medir esforços para me dar todo o suporte necessário sendo o meu porto seguro.

Ao meu irmão, Daniel H. C. dos Santos, o meu norte, pois sempre foi e é um grande exemplo para mim.

Ao meu amor Gabriela Rabuske, pelo carinho que me dedica, pela paciência, e companheirismo, obrigado por nunca desacreditar da minha capacidade e dos meus sonhos, onde deles você faz parte.

As minhas Avós, pelo amor incondicional, e as minhas tias Fátima Todescato e Cinara C. Rocha por de alguma forma ter participação essencial no meu desenvolvimento.

Aos grandes amigos da faculdade, que tornaram minha família em Joinville, em especial ao Fernando J. Roesner que me mostrou o real valor da palavra amizade, se tornando um irmão par mim. Ao Ramon Fernandes, Daniel Chrain, Ezequias B. de Oliveira, Pedro Zagolin, Vinicius Coelho e Vinicius Freire que como verdadeiros amigos não mediram esforços para me auxiliar na execução do presente trabalho. Obrigado por terem compartilhado momentos de plena felicidade e por tornar os de dificuldade mais suave.

Ao meu Orientador, Marcelo Heidemann, por toda dedicação que com sabedoria soube dirigir-me os passos e os pensamentos para o alcance de meus objetivos.

Aos professores da Universidade Federal de Santa Catarina, pelos ensinamentos transmitidos. Em especial ao Professor Breno Barra que tem papel fundamental na minha formação.

Ao laboratorista da Universidade Estadual de Santa Catarina John N. B. Santos que deu total atenção e suporte para me auxiliar na execução de alguns ensaios essenciais para o presente projeto.

Meu sincero obrigado a cada um de vocês que me fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente, sem vocês meu caminho teria sido mais árduo.

*"Happiness only real when shared."*

***Christopher McCandless***

## RESUMO

DOS SANTOS, L.C. (2015). Estudo da estabilização de um solo expansivo através da incorporação de areia verde de fundição residual. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a estabilização volumétrica de um solo residual de gnaiss compactado, com comportamento expansivo, que ocorre na cidade de Joinville - SC, através da incorporação de uma areia verde de fundição residual (ADF). A utilização da areia de fundição se explica por ser o principal resíduo sólido da indústria de fundição, que gera em todo o mundo cerca de 100 milhões de toneladas, sendo 3 milhões gerados no Brasil. Foram executados ensaios de caracterização física básica do solo, os quais indicaram tratar-se de um solo silteoso, muito plástico. Os resultados obtidos nos ensaios Proctor mostraram que o aumento do teor de ADF provoca redução da umidade ótima de compactação e aumento da densidade seca máxima. Sob energia normal de compactação a adição de ADF em valores a partir de 50%, provoca redução da expansão. Para percentuais adicionados inferiores a 30% o solo tem seu desempenho piorado. Sob energia intermediária de compactação a expansão é tanto mais baixa quanto maior o teor de ADF incorporado. Em relação ao CBR, incorporar 10% de ADF é prejudicial tanto em energia normal quanto intermediária. Excetuando essa mistura verificam-se leves ganhos de Índice de suporte. A composição de solo com 70% de ADF, em relação ao seu peso seco, resulta no melhor desempenho mecânico, com níveis de expansão próximos à zero. Verifica-se que em relação ao comportamento geotécnico a estabilização deste solo expansivo através de areia verde de fundição é viável.

**Palavras-chave:** solo expansivo; areia de fundição, estabilização de solos.

## ABSTRACT

DOS SANTOS, L. C. (2015). Study on stabilization of an expansive soil by incorporating green foundry residual sand. Term paper. Infrastructure Engineering, Universidade Federal de Santa Catarina.

This Course Conclusion work presents a study on the volume stabilization of a residual soil of gneiss in compacted state, with expansive behavior that occurs in the municipality of Joinville - SC, by incorporating a green foundry residual sand (FS). The use of foundry sand is explained because it's the principal primary solid residue from the foundry industry, which generates worldwide 100 million tons, with 3 million generated in Brazil. They were performed tests of basic physical characteristics of the soil, which indicated that the soil is silt of high plasticity. The results obtained in Proctor tests showed that the increase in FS content causes reduction in the optimum moisture content and an increased maximum dry density. Under normal energy compression adding FS in amounts from 50% causes a reduction in expansion. For added percentage below 30% soil has its mechanical performance deteriorated. Under intermediate compaction energy, the expansion is much lower the higher the FS content. About the CBR, incorporate 10% of FS is harmful in both energy, normal and intermediate. Except this mixture, checks up slight gains in support level. Soil composition with 70% FS, relative to its dry weight, results in better mechanical performance, with expansion levels near zero. It is noted that in relation to the geotechnical behavior stabilizing expansive soil by this expansive green foundry sand is feasible.

**Key words:** Expansive soil; Foundry sand; Soil stabilization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regiões no mundo com problemas devido a solos expansivos .....	21
Figura 2 - Fluxograma da metodologia empregada.....	38
Figura 3 - Fluxograma da definição da parte experimental .....	38
Figura 4 - Perfil de solo residual.....	39
Figura 5 - Mapa Geológico da região em estudo .....	40
Figura 6 - Jazida de coleta do solo estudado .....	40
Figura 7 - Coleta (a) e análise tátil visual (b) .....	41
Figura 8 - Classificação de resíduos .....	43
Figura 9 - Organograma da preparação das amostras .....	44
Figura 10 – Separação da amostra com 50% de ADF .....	45
Figura 11 – Amostra pronta com 50% de ADF.....	46
Figura 12 - Organograma da execução dos ensaios.....	47
Figura 13 - Organograma dos ensaios de caracterização física .....	48
Figura 14 – Peneiramento .....	48
Figura 15 - Ensaio de sedimentação .....	49
Figura 16 - Massa de cada fração retida.....	50
Figura 17 - Ensaio do Picnômetro na ADF .....	51
Figura 18 - Realização da ranhura com cinzel .....	52
Figura 19 - Solo sendo rolado sobre a superfície de vidro .....	53
Figura 20 - Cilindro de solo com dimensões próximas ao do padrão.....	54
Figura 21 - Amostra no recipiente para a obtenção da umidade.....	54
Figura 22 - Organograma dos ensaios de caracterização mecânica .....	55
Figura 23 - Equipamento Proctor .....	56
Figura 24 – Inserção de solo para compactação (a), desmonte do equipamento (b) e arrasamento (c).....	56
Figura 25 - Obtenção da Umidade .....	57
Figura 26 – Determinação da expansão volumétrica .....	58
Figura 27 – Ensaio de CBR.....	58
Figura 28 - Corpo de prova após penetração do pistão .....	59
Figura 29 - Equipamento para o ensaio de expansibilidade LNEC .....	60



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curvas de compactação das misturas solo areia compostas pelo solo Laterítico Argiloso (LG').....	28
Gráfico 2: Curvas de compactação das misturas solo areia compostas pelo solo Não Laterítico Argiloso (NG').....	28
Gráfico 3: CBR das misturas solo areia, em função do teor de AFR.....	29
Gráfico 4: Expansão obtida no ensaio de CBR das misturas solo areia, em função do teor de AFR .....	29
Gráfico 5: Valores de massa específica aparente seca máxima da amostra de solo e mistura de solo+ADF .....	30
Gráfico 6: Valores da umidade ótima da amostra de solo e mistura de solo+ADF .....	30
Gráfico 7: Variação do CBR em função do teor de ADF .....	31
Gráfico 8: Variação de Expansão em função do teor de ADF .....	31
Gráfico 9: Umidade ótima em função do teor de areia de fundição.....	32
Gráfico 10: Massa Especifica seca Máxima em função do teor de areia de fundição :.....	32
Gráfico 11: Variação dos valores de CBR com o teor de areia de fundição adicionado à matriz Jardim Botânico.....	33
Gráfico 12: Variação dos valores de expansão com o teor de areia de fundição adicionado à matriz Jardim Botânico.....	33
Gráfico 13: Influência da adição de resíduos de areias de fundição na variação do limite de Líquidez e índice de plasticidade .....	34
Gráfico 14: Variação dos valores de expansão com o teor de areia de fundição .....	34
Gráfico 15: Efeito da inclusão da areia de fundição na máxima densidade seca de xisto resistido.....	35
Gráfico 16: Variação da umidade ótima com diferentes teores de areia .....	35
Gráfico 17: Variação do CBR com diferentes teores de areia.....	36
Gráfico 18: Características de compactação de misturas de areia de fundição	37
Gráfico 19 - Curva granulométrica do solo .....	62
Gráfico 20 - Curva granulométrica da ADF .....	63

Gráfico 21 - Curvas granulométricas para diferentes porcentagens de ADF ...	63
Gráfico 22 - Coeficiente de uniformidade e de curvatura .....	65
Gráfico 23 - Curvas de compactação (Energia normal) .....	67
Gráfico 24 - Curvas de compactação (Energia intermediária).....	67
Gráfico 25 - Variação da umidade ótima em relação à porcentagem de ADF .	68
Gráfico 26 - Variação da densidade seca máxima em relação à porcentagem de ADF .....	69
Gráfico 27 - Variação da expansão em relação à porcentagem de ADF .....	70
Gráfico 28 - Variação do CBR em relação à porcentagem de ADF .....	71
Gráfico 29 – Variação da expansão em relação ao tempo.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios das espessuras, diâmetros e superfícies específicas dos minerais de argila .....	19
Tabela 2: Índice de expansão .....	20
Tabela 3: País V/S produção de fundidos: Cenário Mundial .....	24
Tabela 4 - Aplicações das ADF em diferentes países .....	26
Tabela 5 – Características físicas e geotécnicas das areias verdes .....	42
Tabela 6 - Normas Técnicas (ABNT) – Caracterização Ambiental.....	42
Tabela 7 - Especificações das amostras .....	44
Tabela 8 - Normas Técnicas (ABNT) – Caracterização Física e Mecânica.....	47
Tabela 9 - Porcentagem retida de argila, silte e areia .....	64
Tabela 10 - Características das curvas granulométricas.....	64
Tabela 11 - Limites de Atterberg do solo.....	65
Tabela 12 - Classificação do solo.....	66
Tabela 13 - Equações de aproximação.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABIFA	-	Associação Brasileira de Fundição
ADF	-	Areia de Fundição
AFS	-	<i>American Foundry Society</i>
Ag	-	Prata
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
As	-	Arsênio
Ba	-	Bário
BNDES	-	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CBR	-	<i>California Bearing Ratio</i>
Cd	-	Cádmio
CONSEMA	-	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CPRM		Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil
Cr	-	Cromo
DER	-	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
NYS DHSES	-	<i>New York State Division of Homeland Security and Emergency Services</i>
Pb	-	Chumbo

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.2	OBJETIVO GERAL.....	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.2	SOLOS EXPANSIVOS.....	18
2.3	ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS.....	21
<b>2.3.1</b>	<b>Estabilização física.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Estabilização química.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Estabilização mecânica.....</b>	<b>23</b>
2.4	AREIA DE FUNDIÇÃO COMO AGENTE ESTABILIZANTE.....	23
2.5	PESQUISAS ANTERIORES ENVOLVENDO O USO DE ADF.....	27
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1.	MATERIAIS.....	38
<b>3.1.1</b>	<b>Solo residual de gnaissé.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Areia de fundição.....</b>	<b>41</b>
3.2.	MÉTODOS.....	43
<b>3.2.1</b>	<b>Preparação das amostras.....</b>	<b>43</b>
<b>4.</b>	<b>EXECUÇÃO DOS ENSAIOS.....</b>	<b>47</b>
4.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	47
<b>4.1.1</b>	<b>Granulometria.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Massa específica real das partículas.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Limites de Atterberg.....</b>	<b>51</b>
4.2.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	55
<b>4.2.1</b>	<b>Ensaio de compactação (Proctor).....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.2</b>	<b>CBR e Expansão.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Expansibilidade LNEC.....</b>	<b>59</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS.....</b>	<b>61</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	61
<b>5.1.1</b>	<b>Densidade real das partículas.....</b>	<b>61</b>

<b>5.1.2</b>	<b>Granulometria</b> .....	<b>61</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Limites de Atterberg</b> .....	<b>65</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Classificação dos materiais estudados</b> .....	<b>65</b>
<b>5.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA</b> .....	<b>66</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Compactação</b> .....	<b>66</b>
<b>5.2.2</b>	<b>CBR (California Bearing Ratio) e Expansão</b> .....	<b>70</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Expansibilidade LNEC do Solo Residual de Gnaisse</b> .....	<b>73</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	<b>74</b>
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>74</b>
<b>6.2</b>	<b>SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b> .....	<b>75</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O fenômeno de mudança abrupta de volume em solos é uma questão que afeta a sociedade como um todo, porém este problema é desconhecido pelas pessoas que não são do ramo da mecânica dos solos. Segundo Chen (1988) até o final da década de 30 nem os geotécnicos perceberam o problema dos solos expansivos.

A *New York State Division of Homeland Security and Emergency Services* (NYS DHSES, 2014) estima que os EUA tenham custo de aproximadamente US\$ 300 milhões/ano devido a danos causados pela expansão dos solos. Jones e Holtz (1973) fortalecem este fato relatando que o dano dos solos expansivos para estruturas de edifícios e pavimentos é maior do que os danos causados por outros desastres naturais, incluindo terremotos e inundações.

Mahler (1994) alega que este tipo de solo é comum em regiões onde a evapotranspiração anual excede a precipitação, fenômeno presente nas Zonas semiáridas. Ainda segundo o autor “a capacidade de expansão é função de sua natureza mineralógica, tamanho de grão, densidade seca e formação estrutural, permeabilidade, condição de tensão local, e cargas externas aplicadas.” (MAHLER, 1994, p. 24).

Devido à presença dos solos expansivos em todos os cinco continentes e o alto custo devido às consequências de variações volumétricas, o enfoque deste trabalho é realizar um estudo para estabilizar um solo expansivo através da incorporação de areia verde de fundição residual (ADF).

Em meio aos processos industriais geradores de resíduos sólidos a indústria metalúrgica se sobressai em âmbito mundial, impondo desafios para o setor devido à dificuldade do reaproveitamento da matéria advinda do processo de fundição (FERREIRA *ET AL.* 2012).

De acordo com Casotti *et al.* (2011) a indústria de fundição tem como principal resíduo sólido a areia de fundição, em que a quantidade consumida

de areia depende do tipo da peça produzida e varia entre 0,8 e 1 tonelada para cada tonelada de fundido, e após a etapa de desmoldagem, cerca de 90% da areia pode ser facilmente reinserida no processo de produção. Assim, somente cerca de 10%, contaminada ao longo do processo, tem de ser descartada.

A *American Foundry Society* - AFS (2013) relata que a fundição gera em todo o mundo cerca de 103,2 milhões de toneladas de metal, e para suprir a produção mundial do mesmo, utilizam-se aproximadamente 100 milhões de toneladas de areia. Neste contexto, estima-se a geração anual de 3 milhões de toneladas de ADF no Brasil, colocando-o na sétima posição do *ranking* entre os maiores produtores globais de fundidos, onde cerca de 600 mil toneladas são geradas pelo estado de Santa Catarina (CHEGATTI ET AL., 2014).

A realização de estudos que propõem a estabilização dos solos com o reaproveitamento da ADF, a fim de obter ganhos ambientais, técnicos e econômicos, justifica-se diante do percentual descartado de areia de fundição, reflexo da elevada produção de materiais fundidos, e devido a grande ocorrência de danos associados à expansibilidade dos solos.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade da incorporação de areia de fundição como forma de conferir maior estabilidade volumétrica a um solo residual de gnaiss da região de Joinville, quando em estado compacto.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram cumpridos:

- a) Realização da caracterização física e determinação da capacidade de suporte de um solo residual de gnaiss da região de Joinville, o qual mostra comportamento expansivo;
- b) Execução de ensaios de compactação e CBR em misturas preparadas com diversos teores de areia de fundição e do solo em estudo, em diferentes energias de compactação;



- c) Avaliação das modificações promovidas pela adição de ADF ao solo estudado no que tange à expansão, CBR e parâmetros de controle de compactação (umidade ótima e peso específico aparente seco máximo).

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso está organizado em cinco capítulos, dispostos da seguinte forma:

**Capítulo 1** - Neste capítulo introdutório é apresentada a problemática de solos expansivos e dos resíduos sólidos advindos da indústria metalúrgica, de forma a justificar o estudo da aplicabilidade da incorporação das areias de fundição como método de estabilização volumétrica de solos expansivos. Além disso, são expostos os objetivos do trabalho.

**Capítulo 2** - Apresenta-se a revisão bibliográfica, documentando informações sobre solos expansivos e estabilização de solos a partir de modificações físicas, químicas e mecânicas. Adicionalmente são abordadas as características técnicas da areia de fundição e estudos pregressos que discutem a possível estabilização de solos através da mesma.

**Capítulo 3** - São apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa e os métodos empregados para tal.

**Capítulo 4** - É exposta a execução dos ensaios empregados no desenvolvimento do trabalho.

**Capítulo 5** - São apresentados e discutidos os resultados obtidos na campanha experimental.

**Capítulo 6** - São expostas as conclusões deste trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.2 SOLOS EXPANSIVOS

Segundo Terzaghi *et al.* (1996), os solos podem ser divididos em dois grandes grupos, os que são resultados da decomposição química e os que sofrem mudanças devido aos intemperismos físicos. Segundo Ferreira (1995) tanto os solos resultantes da decomposição química quanto os advindos do intemperismo físico, podem ter característica de expansão, devido à presença de minerais argílicos em sua composição ou por ser “solos essencialmente siltosos e micáceos, porém, geralmente decorrentes de desagregação de gnaisse.” (Pinto, 2006, p.353).

Os minerais argílicos podem apresentar estruturas com configurações diferentes, Caputo, (1988, p.18) relata que a divisão é dada “[...] em três grupos principais: caulinitas, montmorilonitas e ilitas”. Estes minerais irão comandar as características de um determinado solo quando compuser 50% ou mais do mesmo (DAS, 2011). Se a sucção exercida na água é aumentada, o volume do solo diminuirá, caso a sucção diminua, o volume do solo cresce (Mahler, 1994). Essa característica torna-se mais expressiva com o elevado valor da superfície específica, pois significa uma maior interação água/partícula. A deformação volumétrica “pode ocorrer tanto devido a mudanças na sucção quanto mudanças na carga aplicada” (Mahler, 1994, p. 24).

Conforme ilustrado na Tabela 1, a montmorilonita é o mineral de argila com maior superfície específica, e conseqüentemente o mais expansivo.

**Tabela 1 - Valores médios das espessuras, diâmetros e superfícies específicas dos minerais de argila**

Vista da Borda	Espessura Típica (nm)	Diâmetro Típico (nm)	Superfície Específica (km <sup>2</sup> /Kg)
Montmorilonita 	3	100-1000	0.8
Ilita 	30	10000	0.08
Clorito 	30	10000	0.08
Caulinita 	50-2000	300-400	0.015

Fonte: Ranjan, 2007, p.99.

O controle de variações de umidade não é simples, uma vez que a água pode ser deslocada vertical e horizontalmente provocando mudanças nos níveis de sucção, e conseqüentemente de volume, por movimentos alternados de expansão e compressão podendo determinar ocorrência de patologias (MILITITSKY *et al.*, 2008).

Chen (1988) descreve que os problemas devido aos solos expansíveis não eram conhecidos pelos engenheiros até os anos de 1930, situação esta diferente da atual, onde há interesse mundial devido aos altos custos gerados pela influência da expansão dos solos nas obras de infraestrutura.

Conforme a *New York State Division of Homeland Security and Emergency Services* - NYS DHSES (2014) as variações volumétricas compreendem um dos perigos geológicos mais caros, estimando-se que 1/4 de todas as casas nos EUA têm algum dano causado pela expansão dos solos, resultando em prejuízos de aproximadamente US\$ 300 milhões/ano. Jones e Holtz (1973) reforçam este fato relatando que o dano dos solos expansivos para estruturas de edifícios e pavimentos é maior do que os danos causados por outros desastres naturais, incluindo terremotos, furacões, inundações e tornados. Este fenômeno pode provocar pressões de até 0,72 Mpa (15 000 lbs).

*per foot*) provocando rachaduras no solo e permitindo infiltração profunda e agravamento da situação (NYS DHSES, 2014).

Na maioria dos casos onde aparecem rupturas verticais e horizontais em paredes do porão, fraturas diagonais que se desenvolvem abaixo da janela e acima das portas, estas são um forte indicativo de movimentos de expansão (Mahler, 1994).

O autor também relata que além da expansão, a contração também pode ser um grande problema, pois pode remover o apoio de edifícios ou outras estruturas, sendo que ambas podem ocorrer repetidamente. Cerri & Amaral (1998) complementam mencionando que problemas de ruptura de pavimentos e rupturas em taludes muito suaves também são uma consequência frequente de instabilidades volumétricas.

A NYS DHSES (2014) relata que apesar da problemática, a população tem pouco conhecimento sobre o tema, de forma geral, devido ao fato de que os danos se propagam de forma lenta.

O potencial expansivo do solo pode ser correlacionado por um índice de expansão padrão, proposto pela ASTM D4829, conforme exposto na Tabela 2.

**Tabela 2: Índice de expansão**

Índice de Expansão
0 a 20 - Muito Baixo
21 a 50 - Baixo
51 a 90 – Médio
91 a 130 - Alto
>130 - Muito Alto

Fonte: NYS DHSES (2014)

G. W. Donaldson (1969) *apud* Chen (1988) relata a ocorrência de solos expansivos em todo o mundo (Figura 1), com situações confirmadas nos seguintes países: Argentina, Irã, Austrália, México, Marrocos, Canadá, Cuba, África do Sul, Etiópia, Espanha, Gana, Turquia, Índia, EUA, Israel e Venezuela.

A lista ainda foi atualizada por Mahler (1994), que incluiu Arábia Saudita, Brasil, Chile, China, França, Nigéria e Zimbábue.

**Figura 1 – Regiões no mundo com problemas devido a solos expansivos**



Fonte: O autor

Como mencionado, a ocorrência é comum, os danos ocasionados pela expansão do solo são grandes e a preocupação com os mesmos é justificável. Para minimizar ou excluir os estragos causados por esta ação, Peck et al. (1974) *apud* Schnaid et al. (2005) define três tipos de medidas para controlar o fenômeno da expansibilidade, os quais:

- i) Isolar a estrutura dos materiais expansivos;
- ii) Reforçar a estrutura para resistir aos esforços provocados pelas forças de expansão, e;
- iii) Eliminar os efeitos de expansibilidade através da estabilização do solo em questão.

### 2.3 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS

Para tornar mínimo o agravo ocasionado pela mudança de volume dos solos, podem ser tomadas medidas preventivas, como isolar as estruturas dos materiais expansivos ou desenvolver o projeto de forma a reforçar as estruturas para contemplar as limitações que o solo impõe. Porém, para agir diretamente

no problema e evitar a manifestação da expansibilidade, a alternativa é a estabilização.

“Estabilização implica qualquer alteração que adeque ou mude as propriedades exigidas por uma determinada construção. Geralmente todas as modificações resultam em maior estabilidade para materiais granulares e solos coesivos” (Reuben, 2003, p.2). Vogt (1971) define a estabilização como todo método que visa aumentar, de maneira durável, durante todas as estações do ano, a resistência de um material aos esforços nele imposto. Baptista (1976) completa mencionando que para estabilizar um solo, de um modo geral, pode-se utilizar um processo qualquer de natureza física, química ou mecânica.

### **2.3.1 Estabilização física**

Dentre os três processos de estabilização mencionados por Baptista (1976), encontra-se a estabilização física. Segundo Pinto (2008), na estabilização física as propriedades do solo são modificadas, alterando-se a sua textura.

Conforme Villibor (1982), a estabilização física por correção granulométrica consiste na combinação e manipulação de solos, em proporção adequada, de maneira a se obter um produto de estabilidade maior que os solos de origem e, adequado para aplicação em cada caso particular.

De modo geral, a estabilização é mais eficiente para composições granulométricas que proporcionam uma máxima densificação. Assim, é fundamental obter uma curva granulométrica contínua que apresente grãos de diversos tamanhos, de maneira que os grãos menores preencham os vazios deixados pelos grãos maiores, mas evitando a perda de contato entre estes, a fim de manter a força de atrito (Klinsky, 2013, p.49).

Além da correção granulométrica, existem outras técnicas envolvendo tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose, que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos (OLIVEIRA, 1994).

### 2.3.2 Estabilização química

Santos et al. (1995) refere-se à estabilização química como um fenômeno que provoca mudanças que influenciam as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade do solo. Mudanças estas almeçadas pela inclusão e reação de “[...] aditivo com os minerais do solo (fração coloidal) ou a constituição de recheio dos poros pelo produto de reação química do aditivo com a água” (MEDINA, 1987).

### 2.3.3 Estabilização mecânica

Gondim (2008) explana que são considerados métodos de estabilização mecânica os procedimentos que alteram apenas o arranjo das partículas do solo ou a granulometria deste. Para tal faz-se uso do processo de compactação do solo, no qual há uma redução do volume de vazios, o que tem relação com o ganho de resistência (SANTOS *et al.*, 1995).

## 2.4 AREIA DE FUNDIÇÃO COMO AGENTE ESTABILIZANTE

Estudos com adição de agentes estabilizantes em solos são comuns. Dentre os elementos utilizados para este fim encontram-se: betume, cimento Portland, cal, produtos químicos industrializados, areia de fundição, entre outros. Como mostram os autores, Teixeira (2014), Santos (1995), Reale (2014), Macêdo (2004) e Guida (1971).

O objetivo da adição é aprimorar as propriedades dos solos de acordo com o desejado, de forma a obter melhorias no comportamento geotécnico do material, como, por exemplo, redução da expansibilidade, variação no suporte, densidade e eventualmente permeabilidade, resultando em ganhos econômicos, técnicos e ambientais.

Diferentemente dos estabilizantes industrializados que são produtos finais, produzido com a função direta de estabilizar os solos, as areias de fundição (ADF) tratam-se de um resíduo industrial. A ADF consiste em um

passivo ambiental, que se caracteriza frente à excessiva geração e alto custo de descarte.

Existem diversos métodos utilizados para moldagem de elementos durante a fundição, mas o uso de areia é a técnica mais usual para moldagem e confecção de machos, sendo empregada há séculos (AFS, 2015). No entanto, a areia gerada por meio deste método, é considerado o maior subproduto e o principal resíduo da indústria de fundição. Conforme dados da AFS, a Tabela 3 mostra a produção de fundidos pelo mundo.

**Tabela 3: País V/S produção de fundidos: Cenário Mundial**

País	2013		2012		2011		2010		2009	
	M.T <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	M.T	R	M.T	R	M.T	R	M.T	R
China	44,5	1	42,5	1	41,26	1	39,6	1	35,3	1
U.S.	12,25	2	12,83	2	10,01	2	8,24	3	7,4	2
Índia	9,81	3	9,34	3	9,99	3	9,05	2	7,4	3
Japão	5,54	4	5,32	4	5,47	4	4,76	5	4,4	4
Alemanha	5,19	5	5,2	5	5,46	5	4,79	4	3,9	6
Rússia	4,1	6	4,3	6	4,3	6	4,2	6	4,2	5
Brasil	3,07	7	2,86	7	3,34	7	3,24	7	2,3	7
Coreia	2,56	8	2,44	8	2,34	8	2,23	8	2,1	8
Itália	1,97	9	1,96	9	2,21	9	1,97	9	1,67	10
França	1,75	10	1,8	10	2,04	10	1,96	10	1,74	9
Outros	12,48		12,28		12,17		11,63		9,93	
Total no mundo	103,22		100,83		98,59		91,67		80,34	

Fonte: American Foundry Society – AFS (2015), adaptado pelo autor

<sup>1</sup>M.T. = milhões de toneladas, <sup>2</sup> R= Rank

Observando os dados apresentados, pode-se verificar que a fundição em todo o mundo continuou a crescer em 2013, tendo um aumento de produção de mais de 3,4 milhões de toneladas, o que corresponde a um avanço de 3,4% em comparação a 2012. As informações indicam a China como sendo líder no ranking na produção de fundidos no mundo, e o Brasil vem ocupando o sétimo lugar com 3,34 milhões de toneladas por ano. Deste



montante, segundo Chegatti et al. (2014), 600 mil toneladas são produzidas no estado de Santa Catarina.

De acordo com Casotti *et al.* (2011) da totalidade de areia consumida, cerca de 90%, pode ser reinserida no processo de produção, mas cerca de 10%, contaminada ao longo do processo, tem de ser descartada.

Em sua maior parte, a disposição final das ADF é feita através do envio para aterro industrial, onde o valor cobrado para essa disposição varia de R\$ 40,00 a R\$ 400,00 por tonelada, dependendo da classificação do resíduo, segundo a NBR 10.004/2004, e da quantidade gerada (Gouvea e Winczkiewicz, 2014). Os autores ainda relatam que a opção por aterros particulares também é uma opção das grandes empresas, porém, os custos não acabam se diferenciando muito dos aterros terceirizados.

Devido ao alto custo gerado pelo descarte das ADF e com o intuito de contribuir para o desenvolvimento sustentável, cada vez mais a busca por alternativa de reutilização vem sendo estudada.

Conforme a Resolução CONSEMA nº 13/2013, as alternativas de aplicação para a utilização da ADF são as abaixo listadas:

- a) 30.20.00 - Usinas de produção de concreto asfáltico - para produção de asfalto;
- b) 30.10.00 - Usinas de produção de concreto e argamassa - para fabricação de artefatos de concreto;
- c) 33.11.00 - Retificação e melhorias de rodovias pavimentadas - para uso em base, sub-base e reforço de subleito para execução de estradas, rodovias e vias urbanas;
- d) 34.41.10 - Disposição final de rejeitos urbanos em aterros sanitários, 71.60.03 - Disposição final de resíduos e/ou rejeitos Classe I, em aterros, 71.60.04 - Disposição final de resíduos e/ou rejeitos Classe II em aterros – para uso como cobertura diária em aterros sanitários e industriais;
- e) 10.40.10 - Fabricação de telhas, tijolos e outros artigos de barro cozido para fabricação de artigos em cerâmica; e
- f) 34.31.11 - Sistemas de coleta e tratamento de esgotos sanitários - como substituinte de materiais minerais no assentamento de tubulações.

“Nos Estados Unidos estima-se o reaproveitamento de aproximadamente 500.000 a 700.000 toneladas de areia de fundição por ano em projetos de engenharia civil.” (QUISSINI, 2009, p. 24). Na Tabela 4 são demonstradas as aplicações já realizadas das ADF em diferentes países.

**Tabela 4 - Aplicações das ADF em diferentes países**

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

Fonte: Quissini, 2009

Contudo, é válida a atenção para a consistência na qualidade ambiental da ADF a ser reutilizada, pois a variação nos processos de fundição gerador do resíduo pode fornecer um efeito sobre as suas características.

Estudo realizado com a mesma ADF do trabalho em questão, caracterizou o material “como um resíduo de não preocupação ambiental, tornando viável a sua reutilização do ponto de vista de não contaminação do solo e causador de efeitos negativos à saúde do ser humano” (HERMENEGILDO, 2011, p. 50).

Carnin (2008) em sua tese sobre o reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas reafirma o exposto, relatando que “os materiais não apresentam riscos ao meio ambiente.” Cabe salientar que ao ser empregado em misturas asfálticas, a areia é revestida pelo ligante, estando menos exposta ao meio ambiente e a possibilidade de lixiviação.

Porém, vale salientar que segundo a ABNT NBR 10004 as areias de fundição são classificadas, em geral, como resíduo Classe IIA, não perigoso e não inerte.

Nos Estados Unidos a regulamentação para o reaproveitamento de resíduos é feito através do TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) para definir a periculosidade do resíduo. De acordo com o TCLP muitas ADF não são caracterizadas como perigosas, entretanto outros resíduos de fundições de metais não-ferrosos podem apresentar características perigosas. (QUISSINI, 2009). Segundo o mesmo autor, um estudo foi feito e avaliou-se 43 amostras de ADF de fundição de ferro e metais não ferrosos e foi concluído que 9 amostras de areia apresentaram As, Ag, Ba, Cd, Cr e Pb acima do regulamento americano, caracterizando estas amostras como materiais tóxicos e impróprios para uso no solo.

## 2.5 PESQUISAS ANTERIORES ENVOLVENDO O USO DE ADF

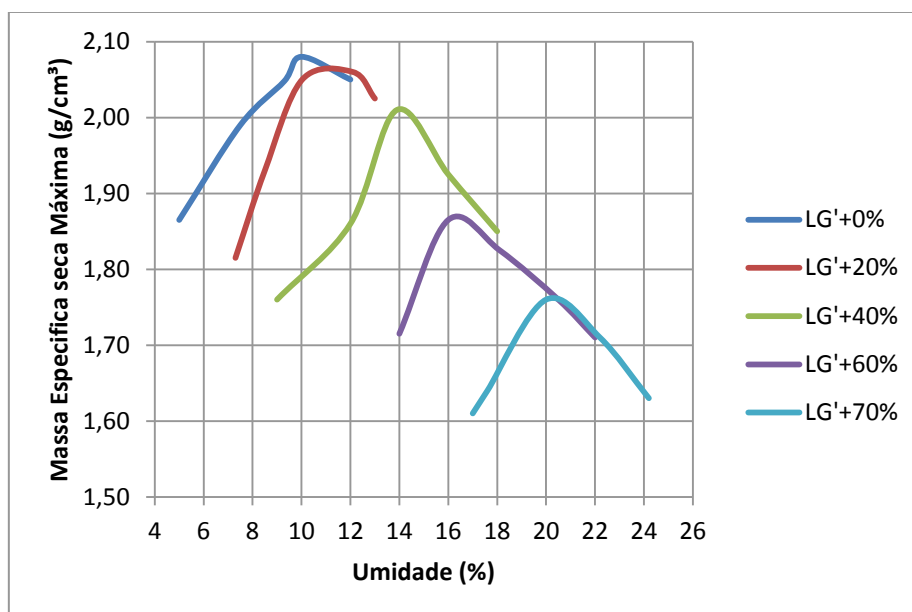
Klinsky (2013), Teixeira (2014), Klinsky e Fabbri (2009), Mgangira (2006) e Sharma e Kurma (2014) realizaram pesquisas para avaliar a viabilidade técnica do emprego de ADF misturada à solos para fins voltados à pavimentação.

Klinsky (2013) teve como objetivo principal em sua pesquisa, a avaliação da possibilidade de reaproveitamento da areia de fundição residual na construção de camadas de base e sub-bases de pavimentos de baixo volume de tráfego, em associação com solos e agentes estabilizantes.

O autor concluiu que os solos classificados pelo sistema MCT como Lateríticos Argilosos (LG'), com adição de 60% e 70% (em massa) de areia de fundição residual atendem aos requisitos exigidos pelo Manual de Normas de Pavimentação do DER-SP (1991) para serem empregados em base de pavimentos. De acordo Manual de Pavimentação do DNIT (2006), o solo Laterítico Argiloso (LG') com 20% de areia de fundição residual ou mais, e as misturas de solos também classificados pelo sistema MCT como não Lateríticos argilosos (NG') com 60% e (NG') com 70% poderiam ser utilizadas na construção de sub-base de pavimentos.

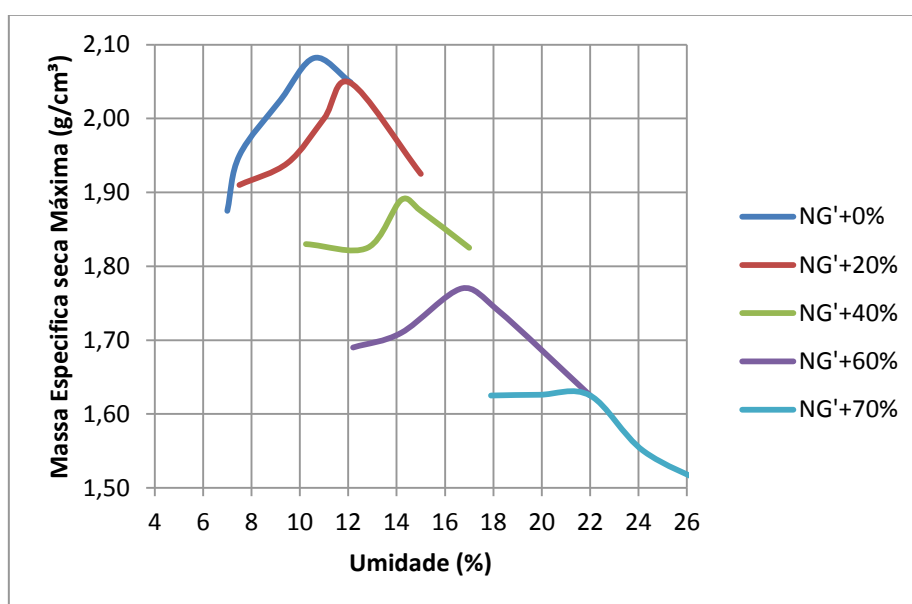
Os resultados experimentais apresentados por Klinsky (2013) são sumarizados nos Gráficos 1 a 4, onde são indicadas as modificações impostas pela adição de AFR aos solos LG' e NG' no que se refere às curvas de compactação, expansão e CBR.

**Gráfico 1: Curvas de compactação das misturas solo areia compostas pelo solo Laterítico Argiloso (LG')**



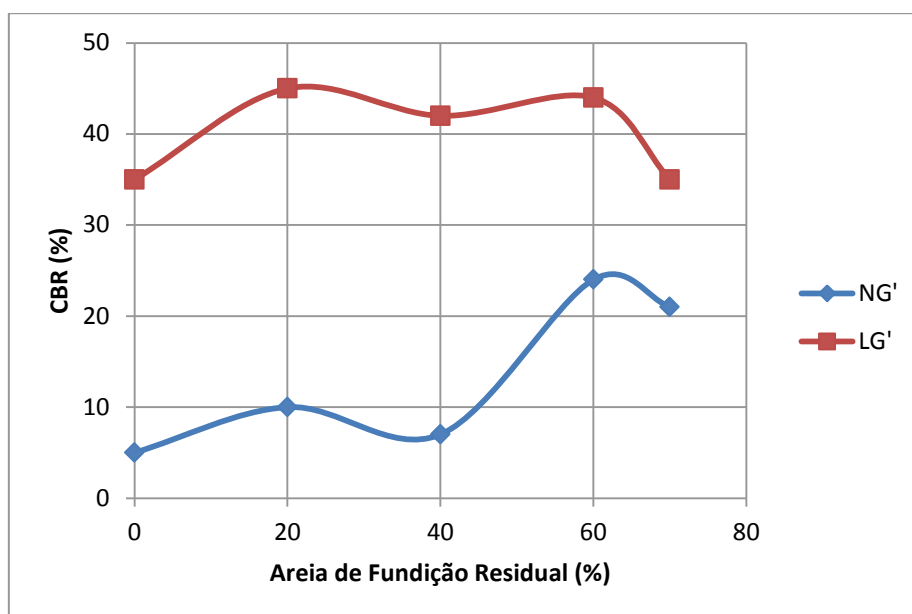
Fonte: Klinsky (2013), adaptado pelo autor

**Gráfico 2: Curvas de compactação das misturas solo areia compostas pelo solo Não Laterítico Argiloso (NG')**



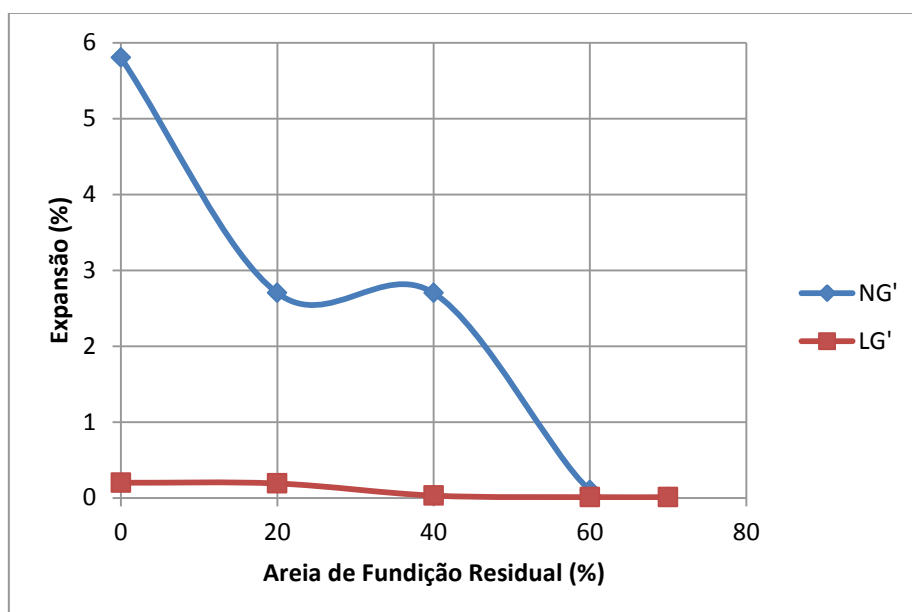
Fonte: Klinsky (2013), adaptado pelo autor

**Gráfico 3: CBR das misturas solo areia, em função do teor de AFR**



Fonte: Klinsky (2013), adaptado pelo autor

**Gráfico 4: Expansão obtida no ensaio de CBR das misturas solo areia, em função do teor de AFR**

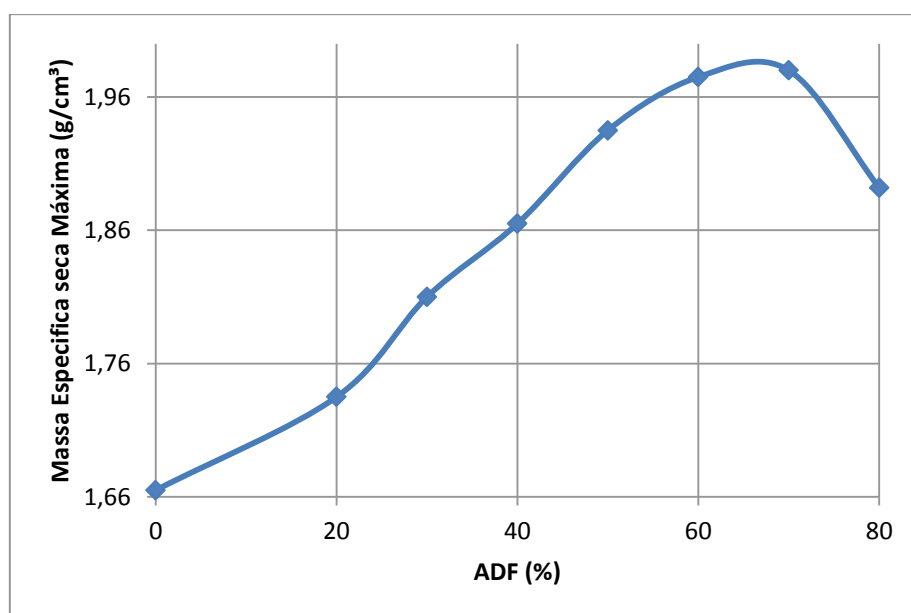


Fonte: Klinsky, 2013, adaptado pelo autor

Posteriormente, Teixeira (2014) verificou a viabilidade técnica e ambiental da aplicação de areia descartada de fundição (ADF) na estabilização granulométrica de uma amostra de solo laterítico argiloso para utilização nas camadas granulares de um pavimento. Para tanto, foram utilizadas diversas

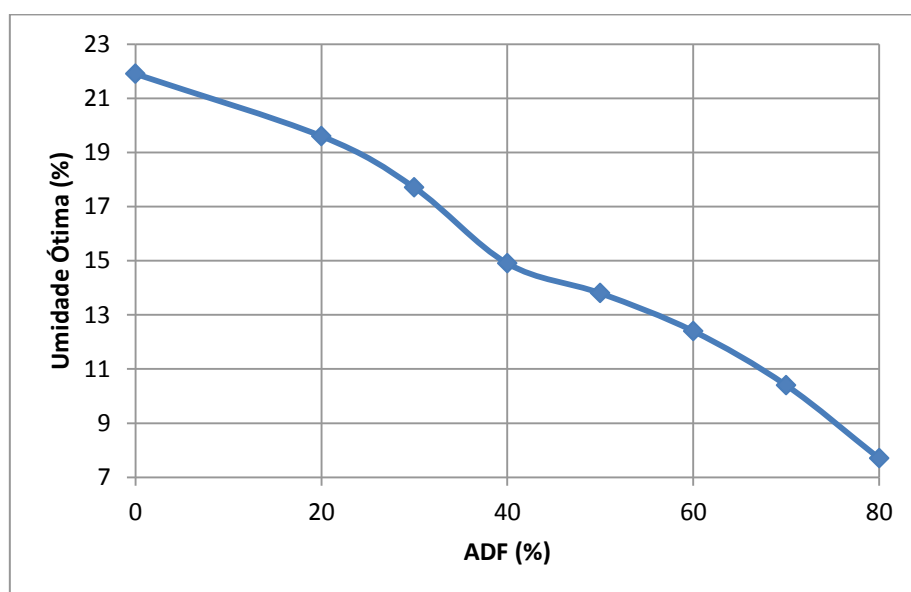
porcentagens de ADF adicionadas ao solo, e verificadas as características física, mecânica e classificação ambiental das amostras. Conforme ilustrado a seguir nos Gráficos de 5 a 8, o autor concluiu que a incorporação de ADF ao solo laterítico argiloso mostrou-se viável no teor de 70% para utilização como sub-base de um pavimento flexível.

**Gráfico 5: Valores de massa específica aparente seca máxima da amostra de solo e mistura de solo+ADF**

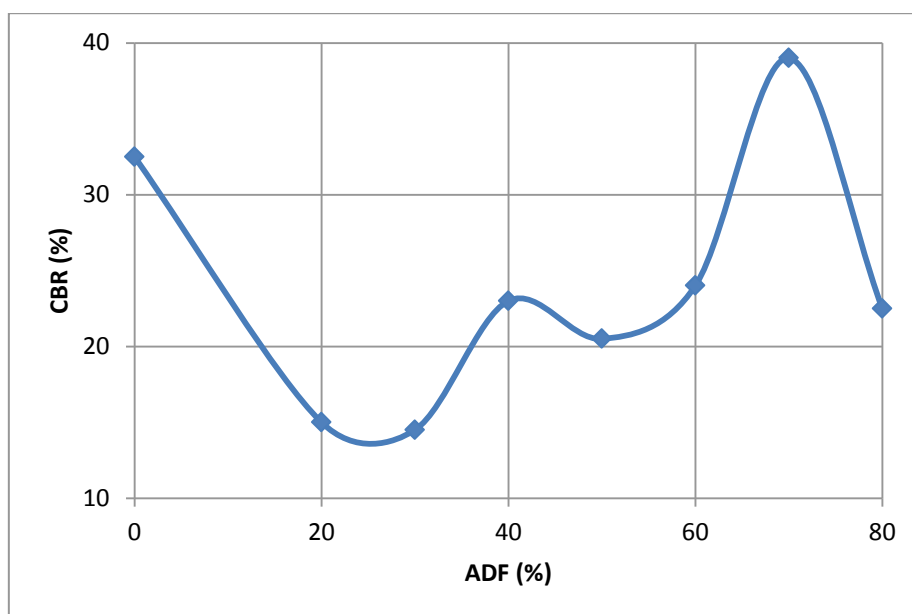


Fonte: Teixeira (2014), adaptado pelo autor.

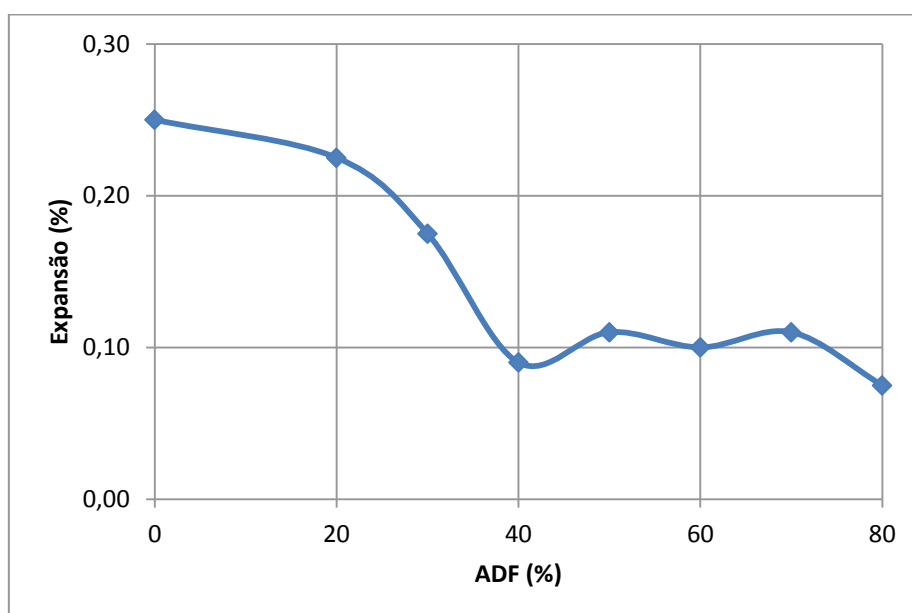
**Gráfico 6: Valores da umidade ótima da amostra de solo e mistura de solo+ADF**



Fonte: Teixeira (2014), adaptado pelo autor

**Gráfico 7: Variação do CBR em função do teor de ADF**

Fonte: Teixeira (2014), adaptado pelo autor

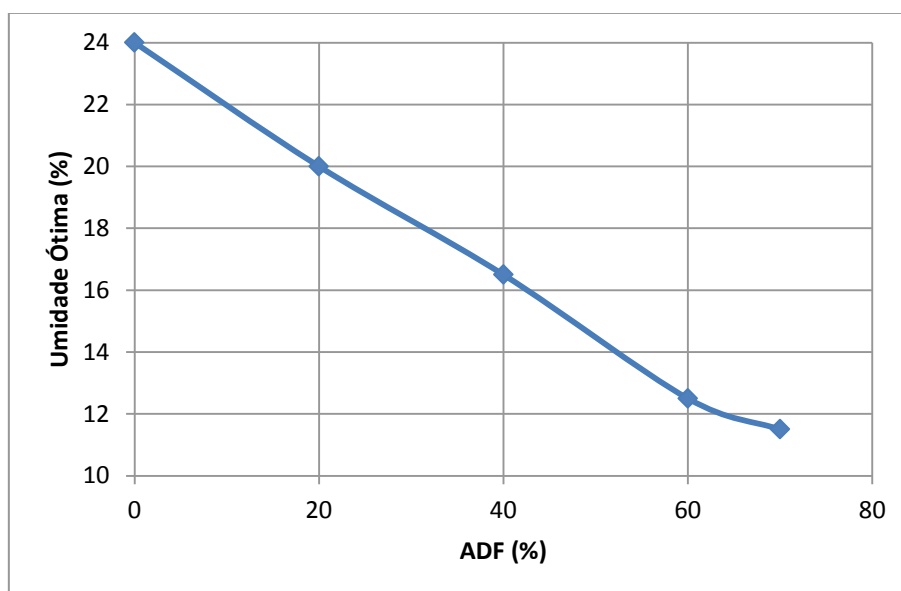
**Gráfico 8: Variação de Expansão em função do teor de ADF**

Fonte: Teixeira (2014), adaptado pelo autor

Klinsky e Fabbri (2009) buscaram avaliar a possibilidade de reutilizar a areia de fundição misturada a solos argilosos da região de Sertãozinho/SP como material para base e sub-base de rodovias de baixo volume de tráfego e vias urbanas, com VDM inferior a 1500 veículos e com  $N \leq 5 \times 10^6$  solicitações de eixo padrão de 80 kN. Os autores concluíram que misturas compostas de

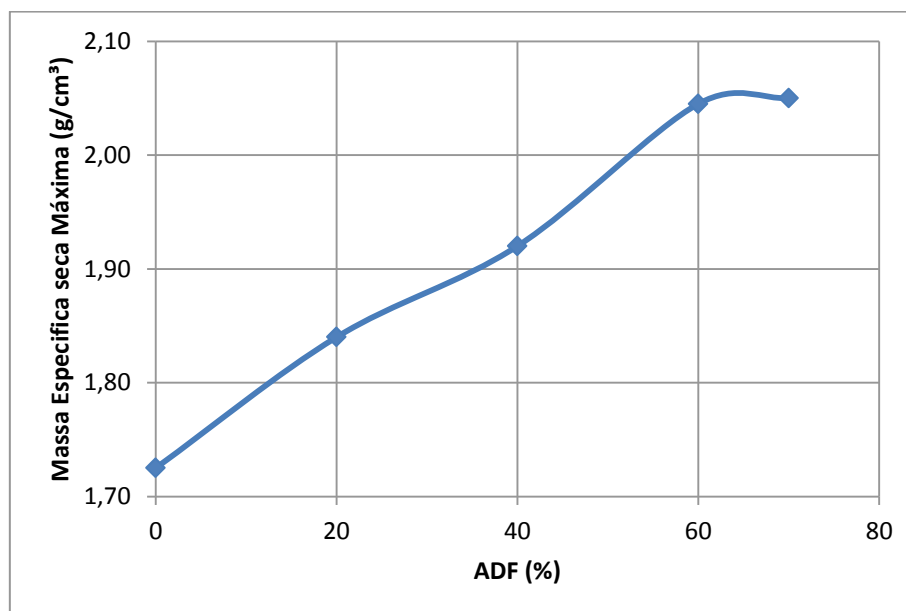
60% e 70% de ADF, poderiam ser utilizadas como material para construção de bases e sub-bases de pavimentos de baixo volume de tráfego. Os Gráficos 9 a 12 resumem os resultados obtidos pelos autores no que se refere aos efeitos da adição de areia de fundição às curvas de compactação, CBR e expansão.

**Gráfico 9: Umidade ótima em função do teor de areia de fundição**



Fonte: Klinsky e Fabbri (2009), adaptado pelo autor

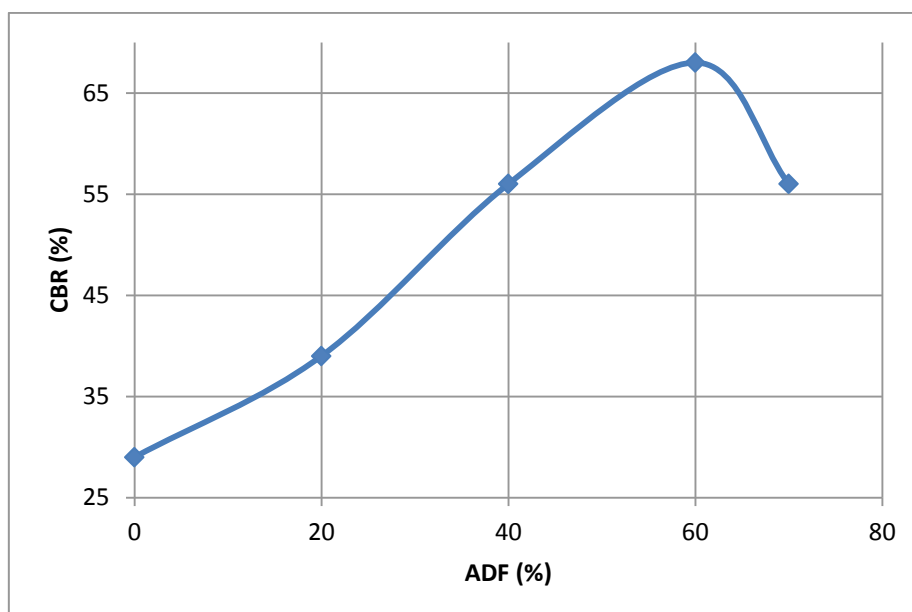
**Gráfico 10: Massa Específica seca Máxima em função do teor de areia de fundição :**



Fonte: Klinsky e Fabbri (2009), adaptado pelo autor

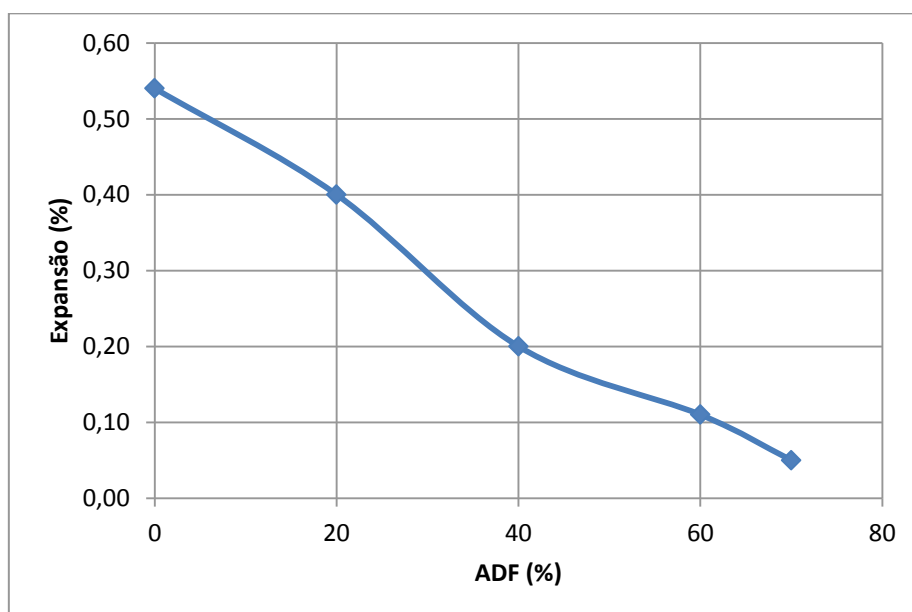


**Gráfico 11: Variação dos valores de CBR com o teor de areia de fundição adicionado à matriz Jardim Botânico**



Fonte: Klinsky e Fabbri (2009), adaptado pelo autor

**Gráfico 12: Variação dos valores de expansão com o teor de areia de fundição adicionado à matriz Jardim Botânico**

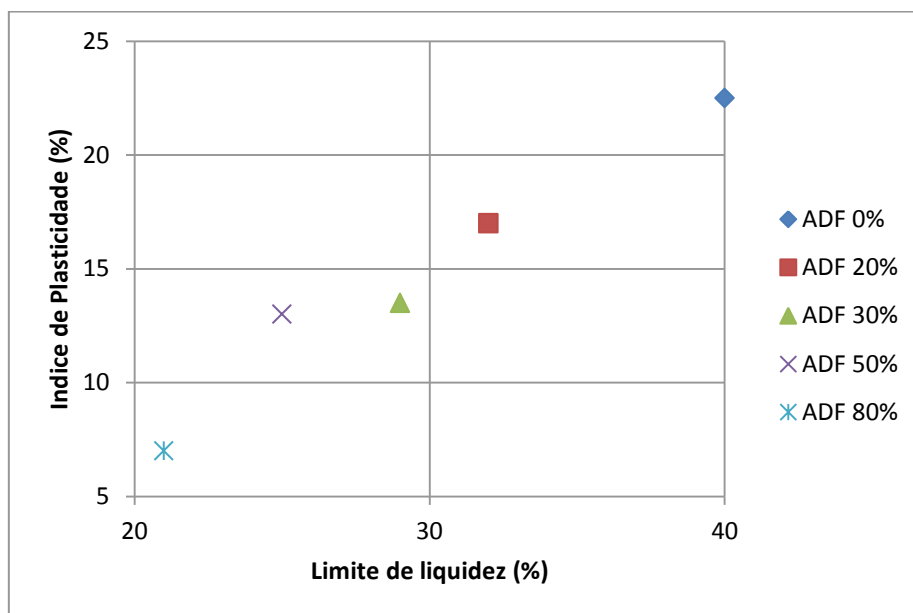


Fonte: Klinsky e Fabbri (2009), adaptado pelo autor

Mgangira (2006) estudou a influência da proporção de areia residual de fundição sobre as propriedades de engenharia geotécnica de solos argilosos. O autor demonstra o efeito da adição das ADF sobre a plasticidade, expansão,

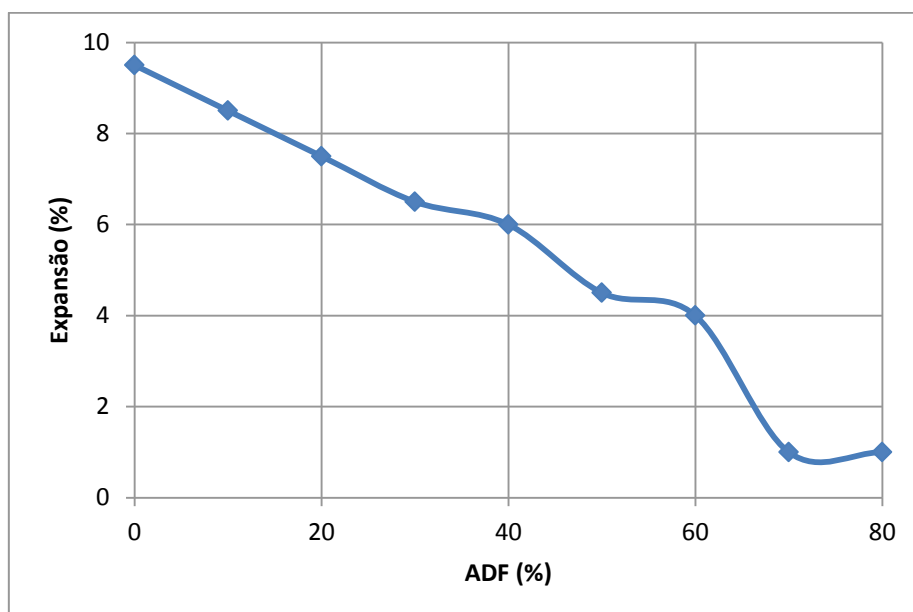
características de compactação e valores de CBR dos solos estudados. Estes resultados são sumarizados nos Gráficos 13 a 17.

**Gráfico 13: Influência da adição de resíduos de areias de fundição na variação do limite de liquidez e índice de plasticidade**



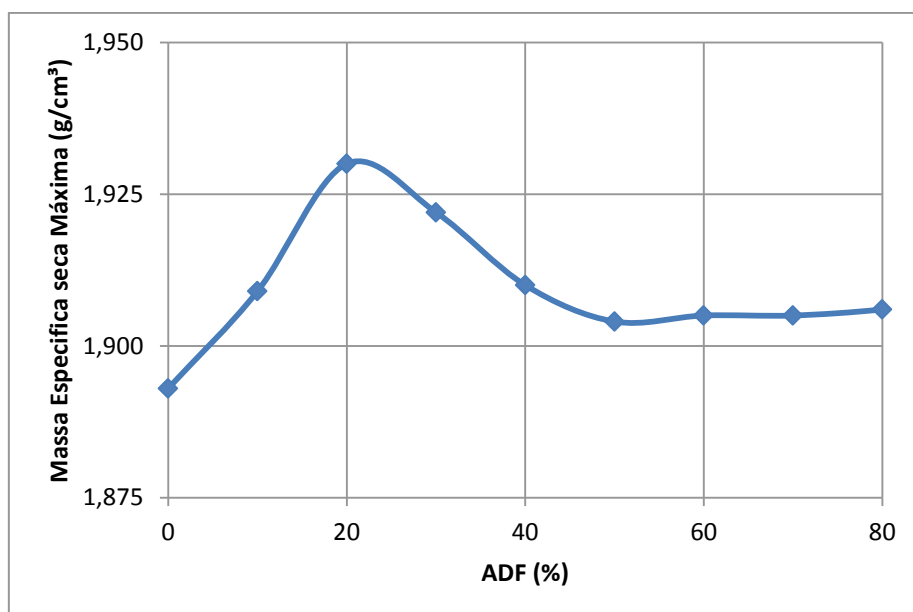
Fonte: Mgangira, M.B (2006), adaptado pelo autor

**Gráfico 14: Variação dos valores de expansão com o teor de areia de fundição**



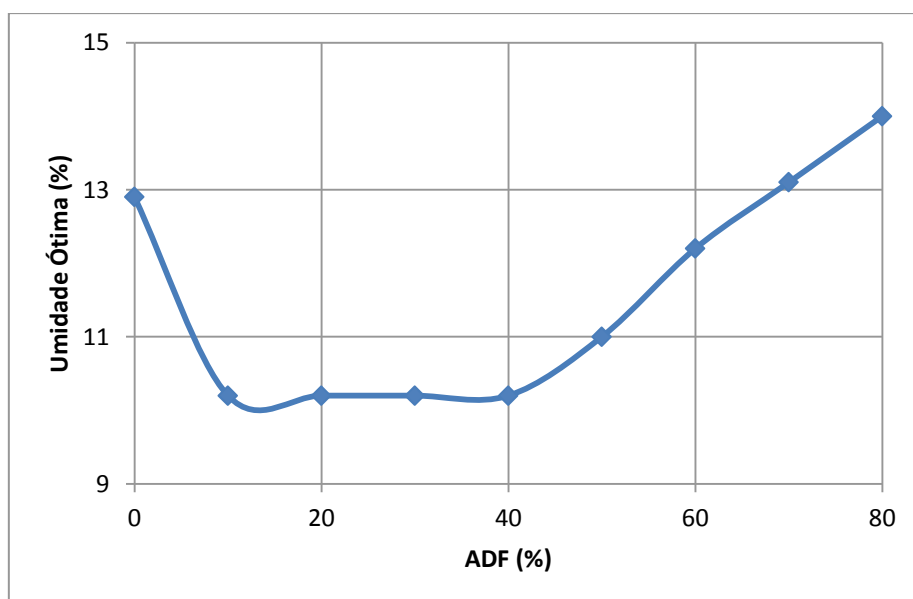
Fonte: Mgangira, M.B (2006), adaptado pelo autor

**Gráfico 15: Efeito da inclusão da areia de fundição na máxima densidade seca de xisto resistido**

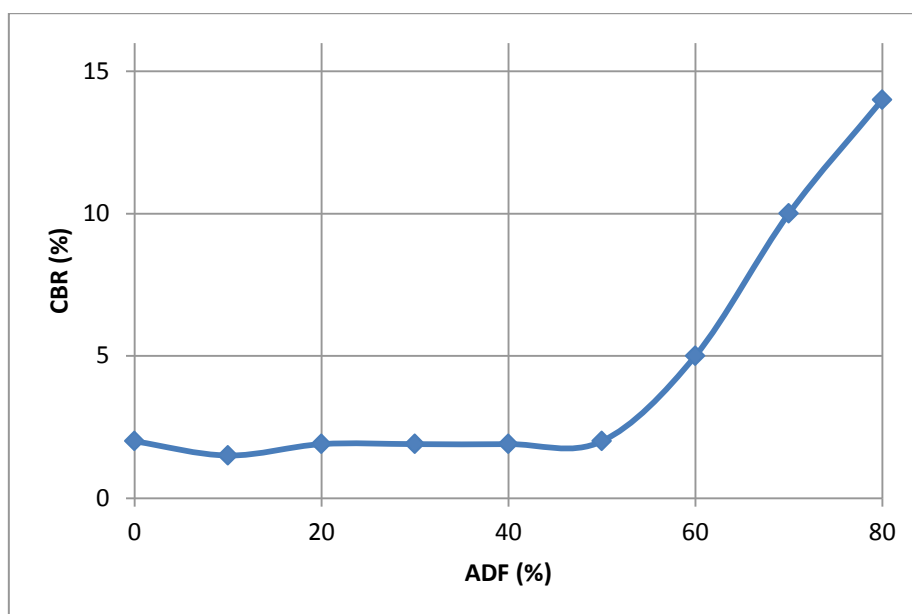


Fonte: Mgangira, M.B (2006), adaptado pelo autor

**Gráfico 16: Variação da umidade ótima com diferentes teores de areia**



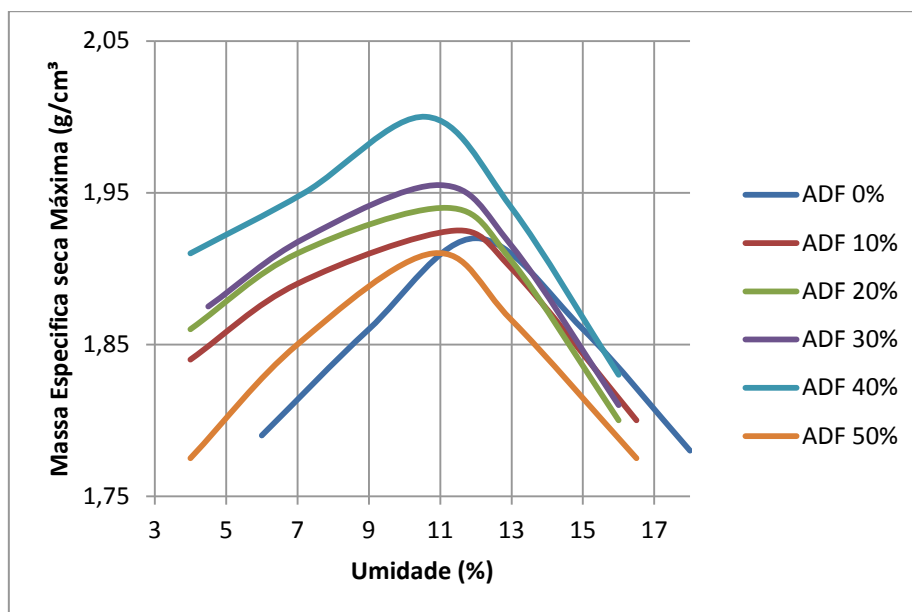
Fonte: Mgangira, M.B (2006), adaptado pelo autor

**Gráfico 17: Variação do CBR com diferentes teores de areia**

Fonte: Mgangira, M.B (2006), adaptado pelo autor

Os resultados mostram que a adição de resíduos de areia de fundição promove mudanças significativas no potencial do solo para aplicações na engenharia geotécnica.

Sharma e Kumar (2014) discutem os efeitos sobre a compactação e características dos solos argilosos de um subleito, gerados pela mistura com areia de fundição e cinza volante. Ensaio de compactação foram realizados em argila com percentagens variáveis de areia de fundição de 10% a 50%, segundo exposto no Gráfico 18.

**Gráfico 18: Características de compactação de misturas de areia de fundição**

Fonte: Sharma e Kurma (2014), adaptado pelo autor

Sharma e Kurma (2014) concluíram que o valor mais alto de densidade seca máxima é alcançado para mistura de 40% ADF. Isto ocorre, pois até 40% de ADF os espaços vazios entre as partículas de areia são ocupados pelas partículas de argila, no entanto, com o aumento excessivo de areia, ocorre segregação das partículas e a densidade máxima seca diminui.

Segundo os mesmos autores o teor de umidade ótima diminuiu com a adição de areia de fundição (até 40%), justificando o ocorrido devido a uma menor quantidade de água necessária para lubrificar as partículas de areia de fundição, em comparação com as partículas de argila.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

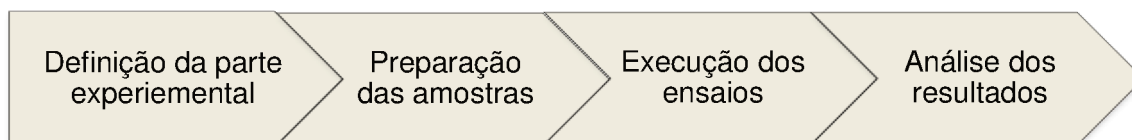
Este capítulo descreve os procedimentos empregados no desenvolvimento do presente trabalho. Além disso, faz-se a caracterização da areia de fundição empregada na pesquisa e descrição do local e condições geológicas e geotécnicas em que ocorre o solo residual investigado.

Em relação aos materiais, foram utilizados: (i) um solo residual de gnaiss, siltoso, expansivo proveniente de uma jazida localizada no município de Joinville – SC, e (ii) uma areia verde de fundição, derivada da moldagem de peças, oriunda de uma indústria localizada no mesmo município.

Com relação à campanha experimental, foram realizados ensaios de laboratório para caracterização física, com a finalidade de determinar curvas de compactação, CBR e expansão. Foram feitos diferentes ensaios, utilizando apenas o solo e em misturas de solo e areia de fundição, em diferentes proporções.

A metodologia utilizada no desenvolvimento desta pesquisa está exposta esquematicamente na Figura 2 a seguir.

**Figura 2 - Fluxograma da metodologia empregada**

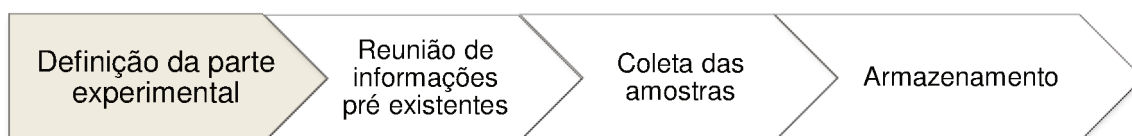


Fonte: O autor

#### 3.1. MATERIAIS

A Figura 3 apresenta as etapas respeitadas para a definição da parte experimental.

**Figura 3 - Fluxograma da definição da parte experimental**

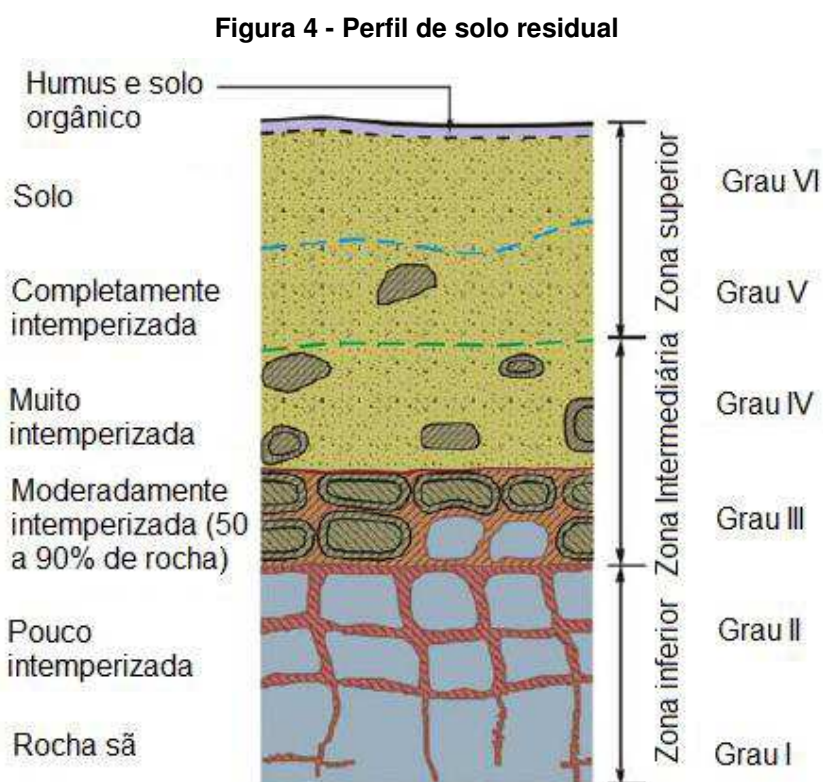


Fonte: O autor

### 3.1.1 Solo residual de gnaiss

O primeiro contato com o solo em estudo foi devido ao interesse da empresa proprietária da jazida em realizar sua comercialização. O material com características previamente desconhecidas foi ensaiado, onde foi possível concluir que sua expansão o tornava pouco interessante para determinadas aplicações, sobretudo, voltadas à pavimentação.

Este solo se encontra na região de Joinville e ocorre como perfil de alteração de gnaisses (Figura 4), que consistem na litologia dominante na região, vide mapa Geológico (Figura 5).



Fonte: LITTLE, A.L. (1969), adaptado pelo autor

Figura 5 - Mapa Geológico da região em estudo



Fonte: CPRM - Geobank (acessado em: 12/11/2015)

Figura 6 - Jazida de coleta do solo estudado



Fonte: O autor

Em visitas subsequentes ao campo (Figura 6), realizou-se análise tátil-visual do material *in situ* (Figura 7). Trata-se de um solo siltoso devido a sua cor avermelhada, coesão razoável com torrões de fácil desagregação, de aspereza menor que as areias, porém menos viscoso que às argilas.



**Figura 7 - Coleta (a) e análise tátil visual (b)**

Fonte: O autor

Para a obtenção das amostras deformadas de solo, foi realizada uma escavação manual com o auxílio de pá. O material coletado foi armazenado em saca de ráfia e posteriormente transportado até o laboratório de mecânica dos solos da UFSC/Joinville. No laboratório foi seco ao ar até atingir a umidade higroscópica.

### **3.1.2 Areia de fundição**

No processo de fundição existem duas diferenciações em relação às areias: areias verdes e areias ligadas quimicamente. Segundo Mariotto (2000) a areia verde tem como constituintes principais a areia base (Sílica), argila (Bentonita), água e aditivos (pó de carvão, pó de madeira, amido etc.), enquanto que as areias ligadas quimicamente Quissini (2009) menciona que as mesmas constituem aditivos tais como catalisadores e resinas fenólicas.

A areia verde de fundição residual utilizada no estudo é proveniente de uma indústria de fundição de Joinville onde utilizam o material como um resíduo de moldagem. As amostras foram fornecidas em dois lotes, ambos oriundos de resíduos de amostra de silo de descarte da Fundição "C", responsável pela produção voltada à manufatura de blocos e cabeçotes para motores de veículos comerciais.

A literatura traz intervalos típicos de variações sobre a areia verde no que diz respeito às características físicas, conforme exposto na Tabela 5.

**Tabela 5 – Características físicas e geotécnicas das areias verdes**

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Densidade Real dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	2,50-2,73
Teor de Bentonita (%)	2-13 %
Teor de umidade (%)	3-5 %
Permeabilidade (m/s)	10-8 – 10-9
Índice de Plasticidade (%)	Em alguns casos não plástica
Análise granulométrica	SP (Areia mal graduada) - SM (Solo siltoso)
Umidade Ótima	8-12 %

Fonte: QUISSINI (2009), adaptado pelo autor

A relação da ADF com o meio ambiente foi conhecida através dos resultados de estudos ambientais fornecidos pela própria indústria, e constam no relatório número 00840 emitido por Acquaplant.

A classificação é realizada pela comparação dos resultados obtidos nas análises com os padrões que se encontram na Norma NBR 10.004 – Resíduos sólidos.

As análises foram realizadas segundo as exigências das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6 - Normas Técnicas (ABNT) – Caracterização Ambiental**

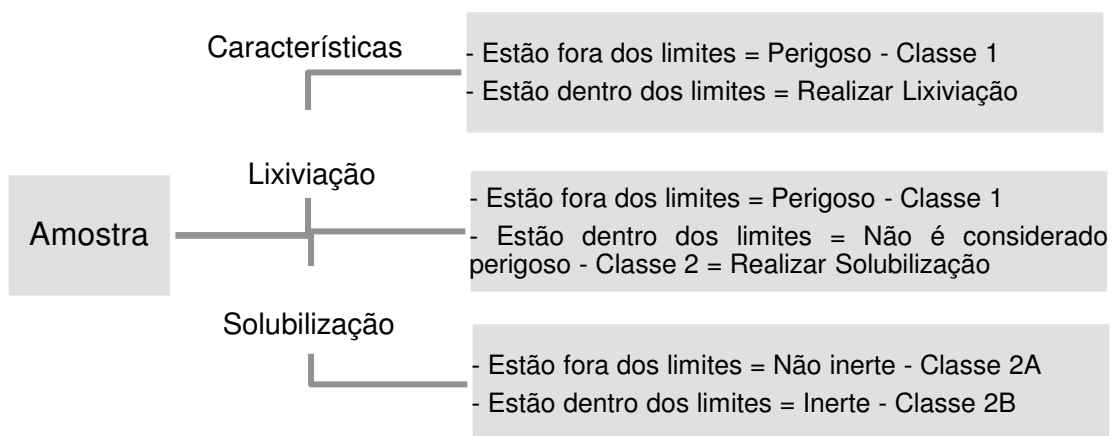
<b>Normas</b>	<b>Ensaio</b>
NBR-10.004	Resíduos Sólidos
NBR-10.005	Lixiviação de Resíduos
NBR-10.006	Solubilização de Resíduos
NBR-10.007	Amostragem de Resíduos
Resolução CONSEMA n°26 de 06/09/2013	Extrato Aquoso
Resolução CONSEMA n°26 de 06/09/2013	Extrato Lixiviado
Resolução CONSEMA n°26 de 06/09/2013	Toxicidade

Fonte: Acquaplant (2015), adaptado pelo autor

De acordo com a comparação, a presente amostra atende aos padrões estabelecidos nas normas ABNT, exceto para a NBR 10.004:2004 - Classificação de Resíduos Sólidos, pois os parâmetros analisados Tensoativos (Surfactantes) ultrapassam os limites máximos permitidos.

Seguindo o fluxograma da Figura 8, o resíduo é classificado como CLASSE 2A – NÃO PERIGOSO – NÃO INERTE.

**Figura 8 - Classificação de resíduos**

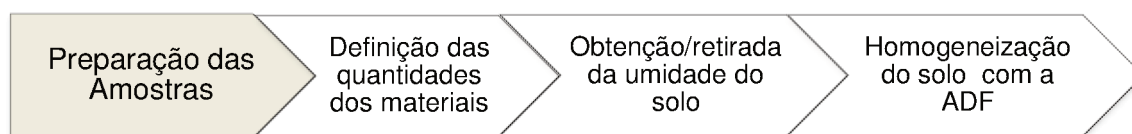


Fonte: Acquaplant (2015), adaptado pelo autor

## 3.2. MÉTODOS

### 3.2.1 Preparação das amostras

O organograma na Figura 9 demonstra as etapas realizadas para a preparação das amostras.

**Figura 9 - Organograma da preparação das amostras**

Fonte: O autor

Com base em trabalhos anteriores, Domingues (2015) e Klinsky (2013), optou-se por avaliar os efeitos da adição de ADF, variando a porcentagem adicionada em relação ao peso seco do solo, em intervalos de 20%. Os ensaios foram realizados em misturas de solo e areia nos teores indicados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Especificações das amostras**

Solo Residual de Gnaisse	Areia de fundição	Total da amostra
100% (4500g)	0% (0g)	4500g
100% (4090,91g)	10% (409,09g)	4500g
100% (3461,54g)	30% (1038,36g)	4500g
100% (3000g)	50% (1500g)	4500g
100% (2647,06g)	70% (1852,94g)	4500g

Fonte: O autor

As amostras utilizadas para execução dos ensaios deste trabalho foram preparadas conforme recomendações constantes na ABNT NBR 6457/84.

A mistura do solo e areia de fundição foi realizada de forma manual, com ambos os materiais secos em estufa. A Figura 10 mostra o aspecto dos materiais durante os preparativos para a mistura.

**Figura 10 – Separação da amostra com 50% de ADF**

Fonte: O autor

Para a realização dos ensaios de compactação e CBR, uma vez que a massa de solo e areia de fundição se apresentasse aproximadamente homogênea, adicionou-se a quantidade necessária de água à mistura para que atingisse a umidade de interesse. Conforme mostrado na Figura 11, posteriormente as amostras foram armazenadas em sacos plásticos hermeticamente fechados por 24 h, de forma a possibilitar a homogeneização da umidade.

Vale ressaltar que apesar da densidade real das partículas de areia ser menor que a do solo, as mesmas migravam para o fundo do recipiente, dificultando a homogeneização. Os grumos do solo residual podem apresentar densidade inferior à da areia em função dos poros existentes no interior dos mesmos.

Figura 11 – Amostra pronta com 50% de ADF



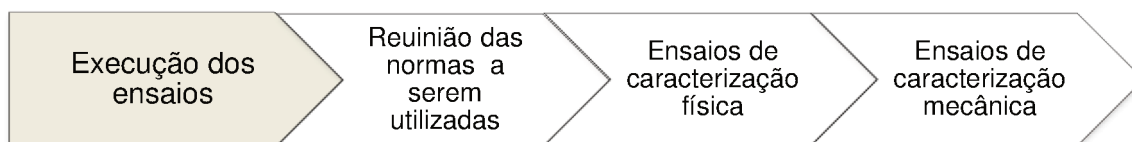
Fonte: O autor



#### 4. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

O fluxograma mostrado na Figura 12 indica os procedimentos empregados na execução dos ensaios de caracterização deste trabalho.

**Figura 12 - Organograma da execução dos ensaios**



Fonte: O autor

Para a classificação física e mecânica dos materiais em estudo, foram realizados os ensaios indicados na Tabela 8, todos em consonância com os procedimentos indicados pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

**Tabela 8 - Normas Técnicas (ABNT) – Caracterização Física e Mecânica**

Norma	Ensaio
NBR 7181/84	Análise granulométrica dos solos
NBR 6459/84	Solo: Determinação do Limite de Liquidez
NBR 7180/84	Determinação do Limite de Plasticidade
NBR 6508/84	Determinação da massa específica
NBR 7182/86	Ensaio de compactação
NBR 9895/87	Solo: Índice de Suporte Califórnia
DNER 029/94	Solo – determinação de expansibilidade

Fonte: O autor

##### 4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física dos materiais foi efetuada por meio dos ensaios, conforme exposto no organograma da Figura 13.

**Figura 13 - Organograma dos ensaios de caracterização física**

Fonte: O autor

#### 4.1.1 Granulometria

Para obter a curva granulométrica dos materiais estudados, foram empregadas amostras de 1 kg sob umidade higroscópica. No caso do solo a amostra foi destorroada. Posteriormente as amostras foram peneiradas na peneira 2,0 mm. A fração retida foi lavada a fim de eliminar o material fino aderido. Posteriormente, secou-se o material na estufa a 105 C<sup>o</sup> para então ser usada no peneiramento grosso.

**Figura 14 – Peneiramento**

Fonte: O autor



Após o material seco, a amostra correspondente ao material retido na peneira 2,0 mm, foi peneirada nas peneiras com aberturas de 19,1, 9,5, 4,8 e 2,2 mm, com o auxílio de agitador mecânico (Figura 14) correspondendo ao peneiramento grosso.

Uma massa de 80 g de solo passante na peneira 2,0 mm foi utilizada para o ensaio de granulometria por sedimentação. Para a ADF, este procedimento não foi necessário, uma vez que trata-se de um material quase que totalmente arenoso, como ver-se-á adiante. A amostra foi embebida em agente defloculante e agitada por 15 minutos. Nesta pesquisa, empregou-se hexametáfosfato de sódio para este fim. Em seguida, transferiu-se a solução (água e solo) para uma proveta graduada, completando-a com água destilada até 1000 ml.

Posteriormente, efetuaram-se leituras de densidade e temperatura da solução nos tempos de 30 s, 1, 2, 3, 4, 8, 15, 30 min, 1, 2, 4, 8 e 24hs.

**Figura 15 - Ensaio de sedimentação**

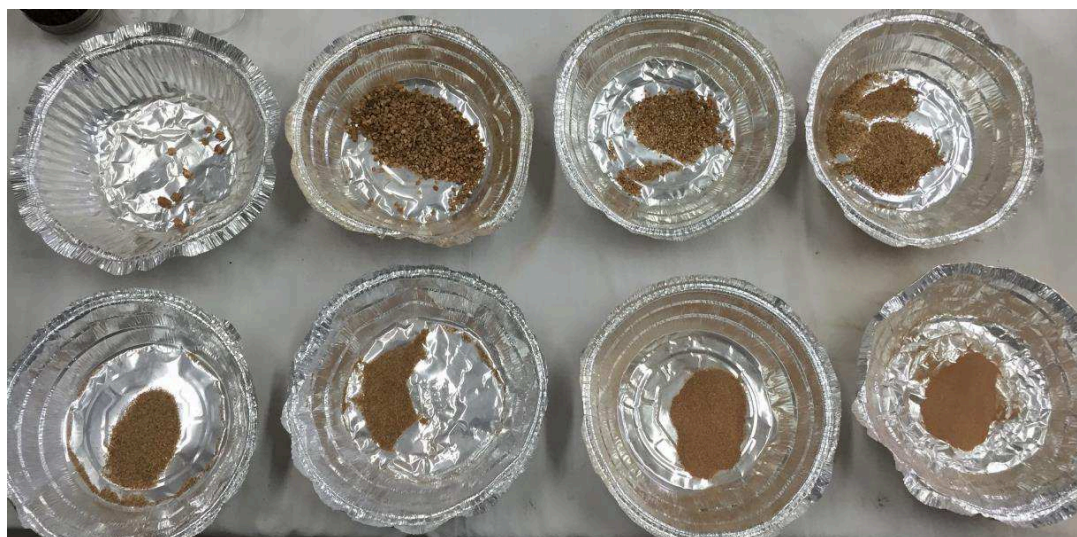


Fonte: O autor

Uma vez concluído o ensaio de granulometria por sedimentação (Figura 15), realizou-se o peneiramento fino do solo. O material empregado no ensaio de sedimentação foi lavado na peneira 0,075 mm. Após isto, o material retido

foi seco em estufa e peneirado nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,3, 0,15, 0,075 mm. Também a ADF foi submetida ao peneiramento nestas peneiras.

**Figura 16 - Massa de cada fração retida**



Fonte: O autor

Através das massas de cada fração, vide Figura 16, foi possível traçar a curva granulométrica. A terminologia adotada para referir-se ao tamanho das partículas obedece aos critérios estabelecidos na norma NBR 7181/84.

#### 4.1.2 Massa específica real das partículas

A densidade real das partículas de solo é obtida conforme recomendações apresentadas na NBR 6508/84. Esta norma estabelece os procedimentos para execução do ensaio de picnômetro. A densidade real das partículas de solo é calculada por meio da expressão abaixo.

$$\delta = \frac{P_s}{(P_s + P_2 - P_1)} \delta_{aT}$$

$P_1$  = Peso do picnômetro, solo e água

$P_2$  = Peso do picnômetro com água pura

$P_s$  = Peso do solo seco

$\delta_{aT}$  = Densidade da água à temperatura T °C do ensaio.

O ensaio foi efetuado em uma amostra de solo e em uma amostra de areia, ambas passantes na peneira 4,8 mm, com cerca de 250 g. Das 250 g, foi

retirado 100 g para o ensaio propriamente dito e o restante levou-se a estufa para determinação da umidade. Para a execução do ensaio, empregou-se um balão volumétrico de 1000cm<sup>3</sup>.

As amostras utilizadas no ensaio foram transferidas para o balão volumétrico, ao qual foi adicionada água destilada até cerca da metade do volume do mesmo. A seguir, colocou-se o recipiente em banho-maria sob uma fonte de calor de forma a promover a ebulição da solução até que se pudesse perceber a ausência de ar na amostra. Em seguida, acrescentou-se novamente água destilada para que o volume do balão fosse completado.

Na medida em que ocorria o resfriamento, determinou-se a temperatura do conteúdo do balão volumétrico e a sua massa, com um intervalo médio de 3 em 3°C. Por fim, calibrou-se o balão volumétrico fazendo o mesmo processo descrito no parágrafo anterior, porém, desta vez, apenas com água, a fim de avaliar o real volume do balão sob diferentes temperaturas.

A Figura 17 mostra o processo de ensaio para determinação do peso específico.

**Figura 17 - Ensaio do Picnômetro na ADF**



Fonte: O autor

#### **4.1.3 Limites de Atterberg**

A quantidade de solo a ser tomada como amostra para os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade é normatizada pela NBR 6457/84.

Segundo a norma, deve-se tomar 200 g de solo passante na peneira de 0,42 mm para a realização dos mesmos.

#### 4.1.3.1 Limite de Liquidez

É a umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo. Experimentalmente corresponde ao teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura com a influência do impacto de 25 golpes no aparelho de Casagrande.

Para obter o valor de limite de liquidez, transferiu-se inicialmente parte das 200 g de amostra para um recipiente e adicionou-se água. Depois de a amostra estar homogeneizada foi colocada na concha de Casagrande e em seguida, com um cinzel, foi aberta uma ranhura na sua parte central. A Figura 18 mostra a execução do ensaio.

**Figura 18 - Realização da ranhura com cinzel**



Fonte: O autor

O número de golpes necessários para a ranhura se fechar ao longo de aproximadamente 13 mm foi contado, e uma amostra na parte que a ranhura se fechou foi tomada para a obtenção da umidade.



O mesmo ciclo foi repetido mais 5 vezes, variando a umidade do solo sempre de forma crescente.

Utilizando-se os valores de umidade e os números de golpes para o fechamento da ranhura, plotou-se um gráfico e fez-se uma aproximação linear dos pontos, tornando possível a obtenção do teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura mediante 25 golpes no aparelho de Casagrande.

#### 4.1.3.2 Limite de plasticidade

O limite de plasticidade representa a transição entre o estado plástico e sólido. Experimentalmente, o LP corresponde ao teor de umidade de um determinado solo, em que se torna possível moldar um bastão de 10 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro, rolando o solo com a palma da mão sobre a superfície de um vidro texturizado. A Figura 19 mostra a execução do ensaio e a Figura 20 mostra o aspecto apresentado pelo bastão de solo quando atingidas as dimensões estabelecidas como critério de parada.

**Figura 19 - Solo sendo rolado sobre a superfície de vidro**



Fonte: O autor

**Figura 20 - Cilindro de solo com dimensões próximas ao do padrão**



Fonte: O autor

Como indicado pela norma NBR 7180/84, o bastão foi moldado e quando alcançado tal objetivo, verificou-se se havia o surgimento das primeiras trincas no solo. Verificada esta condição, o bastão foi levado à estufa para a obtenção da umidade (Figura 21). Este procedimento foi repetido por mais duas vezes, de modo a obter três valores de umidade e posterior determinação da média.

**Figura 21 - Amostra no recipiente para a obtenção da umidade**



Fonte: O autor

#### 4.1.3.3 Índice de plasticidade

O Índice de Plasticidade representa a diferença entre os limites de liquidez e plasticidade, e indica o intervalo de umidade em que o solo pode ocorrer em estado plástico. Pode ser expresso por meio da equação abaixo.

$$I_p = W_l - W_p$$

Considera-se o índice de plasticidade nulo quando não é possível determinar o  $W_l$  ou o  $W_p$  ou quando os dois apresentam o mesmo valor.

## 4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A caracterização do comportamento mecânico do solo foi efetuada por meio de ensaios de CBR, no que se refere ao índice de suporte. Para determinação do potencial expansivo do solo foram efetuadas medições de expansão durante o ensaio de CBR, empregando-se também o ensaio de expansibilidade LNEC. Para determinação dos parâmetros de controle de compactação do solo foram efetuados ensaios de compactação proctor. A Figura 22 sumariza o conjunto de ensaios executados nesta fase da pesquisa.

**Figura 22 - Organograma dos ensaios de caracterização mecânica**



Fonte: O autor

### 4.2.1 Ensaio de compactação (Proctor)

O objetivo do ensaio de compactação Proctor é determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica, aparente seca, de uma amostra quando compactado com determinada energia, de modo a ser possível a obtenção da umidade ótima e densidade seca máxima das amostras.

Segundo a NBR 7182/86 o ensaio pode ser realizado em três energias de compactação: normal, intermediária e modificada.



No presente trabalho realizou-se o ensaio sob energias normal e intermediária, tanto nas amostras compostas por solo e ADF, quanto em amostras de solo, unicamente. O equipamento utilizado para compactação do solo é mostrado na Figura 23 e o procedimento de compactação indicado na Figura 24. A Figura 25, por sua vez, mostra a pesagem das amostras para determinação do teor de umidade. As curvas de compactação foram definidas com base em cinco pontos experimentais.

**Figura 23 - Equipamento Proctor**



Fonte: O autor

**Figura 24 – Inserção de solo para compactação (a), desmonte do equipamento (b) e arrasamento (c)**



a)

b)

c)

Fonte: O autor



Figura 25 - Obtenção da Umidade



Fonte: O autor

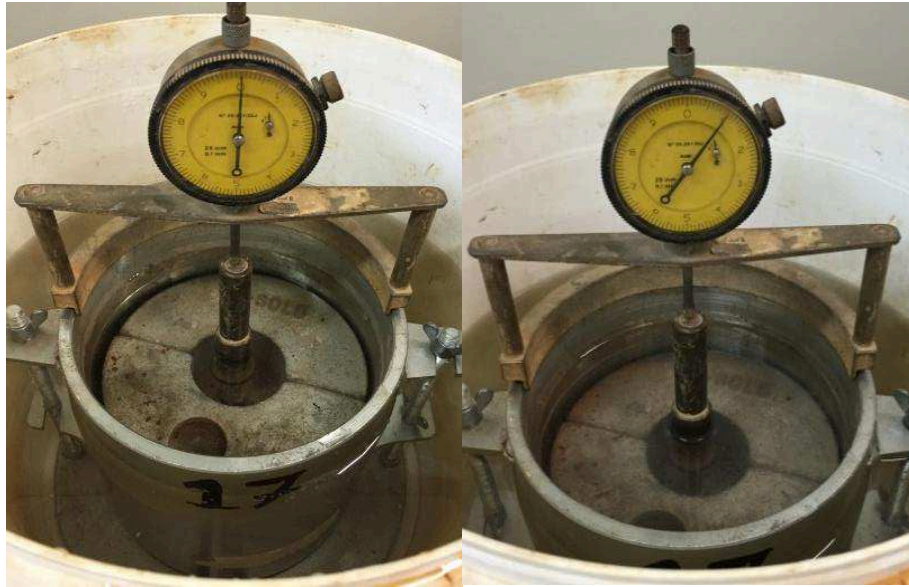
#### 4.2.2 CBR e Expansão

O ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*) avalia a resistência de uma amostra de solo compactada em relação a uma amostra de brita graduada da Califórnia, que foi adotada como padrão de referência. Também no CBR é medida a expansão, mostrando o quanto o solo é sensível ao aumento de volume quando em contato com a água.

Os ensaios de CBR foram executados em amostras compactadas pelo método Proctor, sob umidade ótima, com energia normal e intermediária de compactação. Após devidamente compactado, o corpo de prova foi submerso por quatro dias.

Após este período fez-se a determinação da expansão (Figura 26) e do índice de suporte (Figura 27) empregando-se uma prensa manual, dotada de um anel dinamométrico com 5 toneladas de capacidade. A Figura 28 mostra o aspecto do corpo de prova após a execução da determinação do índice de suporte.

**Figura 26 – Determinação da expansão volumétrica**



Fonte: O autor

**Figura 27 – Ensaio de CBR**



Fonte: O autor

**Figura 28 - Corpo de prova após penetração do pistão**



Fonte: O autor

### **4.2.3 Expansibilidade LNEC**

O ensaio de expansibilidade LNEC foi realizado segundo as orientações da norma do DNER-ME 029/94. O ensaio consiste em um método para a determinação da expansibilidade que segundo Costa (2015) é livre, já que as amostras não estão sujeitas a cargas que limitem a sua capacidade de expansão.

Leituras periódicas do aumento de volume através do defletômetro foram feitas até que duas delas apresentassem o mesmo valor em um intervalo de 2h.

A Figura 29 mostra o equipamento utilizado para o ensaio de expansibilidade LNEC.

**Figura 29 - Equipamento para o ensaio de expansibilidade LNEC**



Fonte: O autor

## **5. RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS**

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais executados neste trabalho.

### **5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

#### **5.1.1 Densidade real das partículas**

A densidade real das partículas do solo em análise apresenta o valor de 2,796. Este valor encontra-se dentro do intervalo entre 2,6 e 2,8, tipicamente encontrados em solos.

Já a areia de fundição é menos densa, com valor igual a 2,785, valor este compatível com os apresentados por Quissini (2009), que reporta resultados normalmente contidos no intervalo entre 2,50 e 2,73.

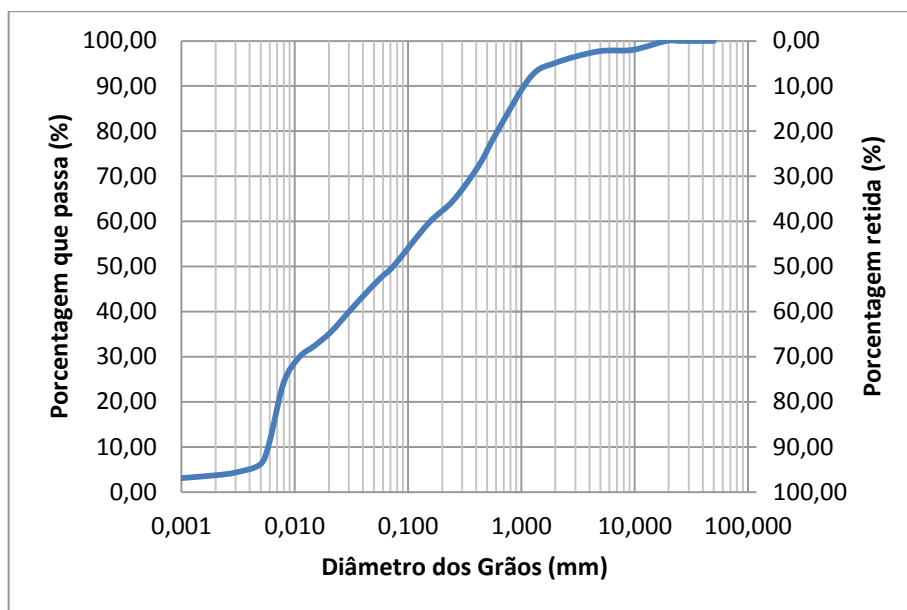
#### **5.1.2 Granulometria**

Através do peneiramento e sedimentação, foi possível determinar as curvas granulométricas do solo residual, da ADF e das misturas de solo e ADF empregadas neste trabalho.

##### **5.1.2.1 Solo Residual de Gnaisse**

Através da curva granulométrica (Gráfico 19) é possível observar que há predominância das partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm, representando aproximadamente 45% da amostra. Segundo a NBR 6502/95, trata-se de um solo com características dominantes provenientes da fração siltosa.

Gráfico 19 - Curva granulométrica do solo



Fonte: O autor

Através da curva granulométrica é possível a obtenção do coeficiente de uniformidade (CU) e o coeficiente de curvatura (CC), embora sejam conceitos típicos de solos granulares.

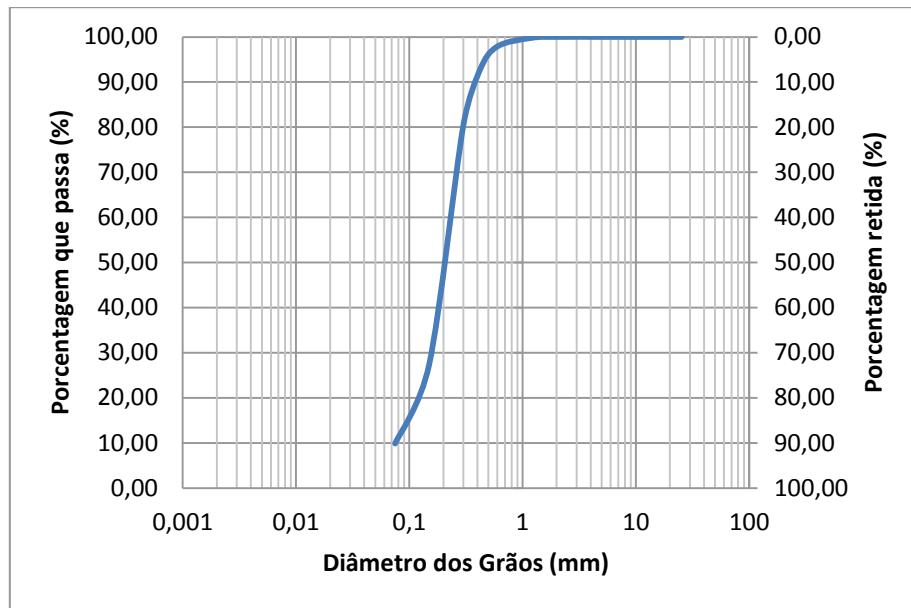
O solo em questão apresenta valores de CU igual a 25,6, sendo então classificado como desuniforme e CC igual a 0,10, mostrando se tratar de um solo mal graduado.

#### 5.1.2.2 Areia de Fundição

O material estabilizante, areia de fundição, consiste, como o nome sugere, em um material arenoso, composto por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm, conforme Gráfico 20. Este solo apresenta CU igual a 3,07, classificando-se como um solo uniforme devido a inexpressiva quantidade de partículas menores que 0,075 mm. O coeficiente de curvatura (CC) é da ordem de 1,48, tratando-se de um solo bem graduado.



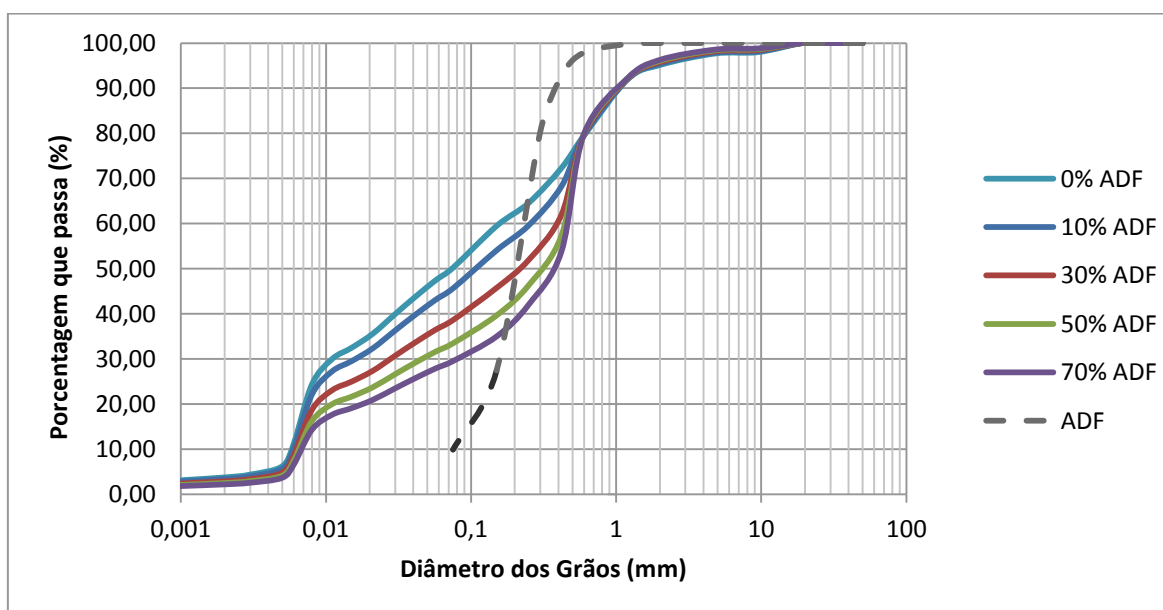
Gráfico 20 - Curva granulométrica da ADF



Fonte: O autor

Pelos motivos explanados nos capítulos anteriores, as amostras trabalhadas tratam-se da combinação do solo siltoso e da areia de fundição. Para entender as mudanças granulométricas impostas pela adição de ADF, o Gráfico 21 mostra as curvas granulométricas relativas às misturas de solo e ADF.

Gráfico 21 - Curvas granulométricas para diferentes porcentagens de ADF



Fonte: O autor

Nota-se que com o acréscimo da areia de fundição, as partículas de silte e argila vão sendo substituídas pela fração arenosa (Tabela 9). À medida que essas mudanças ocorrem as amostras se aproximam de uma distribuição contínua de diâmetros (CC entre 1 e 3), conforme mostrado na Tabela 10 e plotado no Gráfico 22.

**Tabela 9 - Porcentagem retida de argila, silte e areia**

	Argila (D<0,002 mm)	Silte (0,002<D<0,06 mm)	Areia (0,06<D<2mm)	
<b>Solo+0%ADF</b>	3,75	43,69	47,71	(%) Retida
<b>Solo+10%ADF</b>	3,41	39,72	57,27	(%) Retida
<b>Solo+30%ADF</b>	2,88	35,74	62,29	(%) Retida
<b>Solo+50%ADF</b>	2,50	29,13	64,44	(%) Retida
<b>Solo+70%ADF</b>	2,21	25,70	68,37	(%) Retida

Fonte: O autor

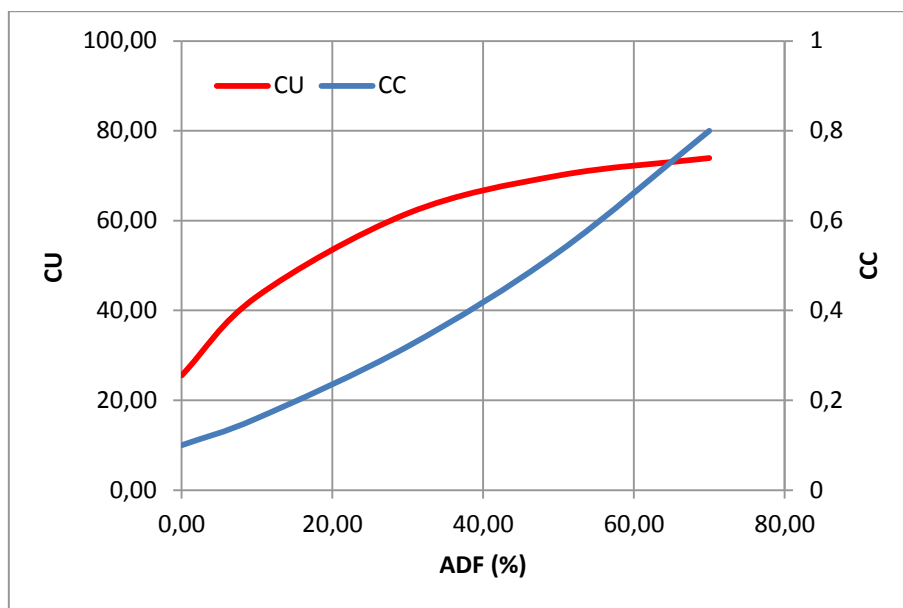
**Tabela 10 - Características das curvas granulométricas**

	CU	CC	Uniformidade	Gradação
<b>Solo+0%ADF</b>	25,54	0,10	Desuniforme	Mal graduado
<b>Solo+10%ADF</b>	43,13	0,16	Desuniforme	Mal graduado
<b>Solo+30%ADF</b>	61,62	0,32	Desuniforme	Mal graduado
<b>Solo+50%ADF</b>	70,04	0,53	Desuniforme	Mal graduado
<b>Solo+70%ADF</b>	73,93	0,80	Desuniforme	Mal graduado

Fonte: O autor



Gráfico 22 - Coeficiente de uniformidade e de curvatura



Fonte: O autor

### 5.1.3 Limites de Atterberg

Os valores de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Limites de Atterberg do solo

Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
47	30,6	16,4

Fonte: O autor

Através dos resultados, nota-se que o solo em estudo é altamente plástico, com IP maior que 15. A Areia de fundição foi classificada como não plástica.

### 5.1.4 Classificação dos materiais estudados

A partir da distribuição granulométrica e com os valores de LL, LP e IP torna-se possível classificar o solo e a ADF por meio de sistemas de classificação consagrados (Tabela 12).

Tabela 12 - Classificação do solo

Classificação granulométrica	Classificação trilinear	Classificação SUCS		Classificação rodoviária (TRB)	
				Grupo	Classificação geral
Silte	Areia siltosa	ML	Silte de baixa compressibilidade	A-7-5	Solo argiloso
Areia	Areia	SP	Areia mal graduada	A-3	Areia Fina

Fonte: O autor

Com o auxílio das inter-relações presentes do Manual de Pavimentação do DNIT (2006), conclui-se que o solo em questão se trata de um material Siltoso, sendo este um solo residual de gnaiss. A ADF como era esperado, trata-se de uma areia.

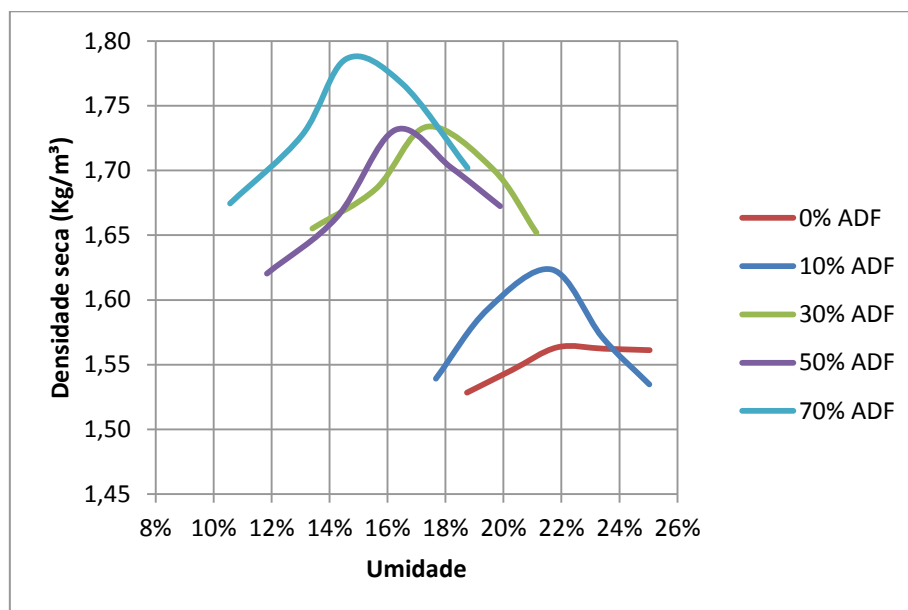
## 5.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

### 5.2.1 Compactação

As curvas de compactação obtidas nos ensaios Proctor, com energia normal e intermediária, são apresentadas nos Gráfico 23 e 24.

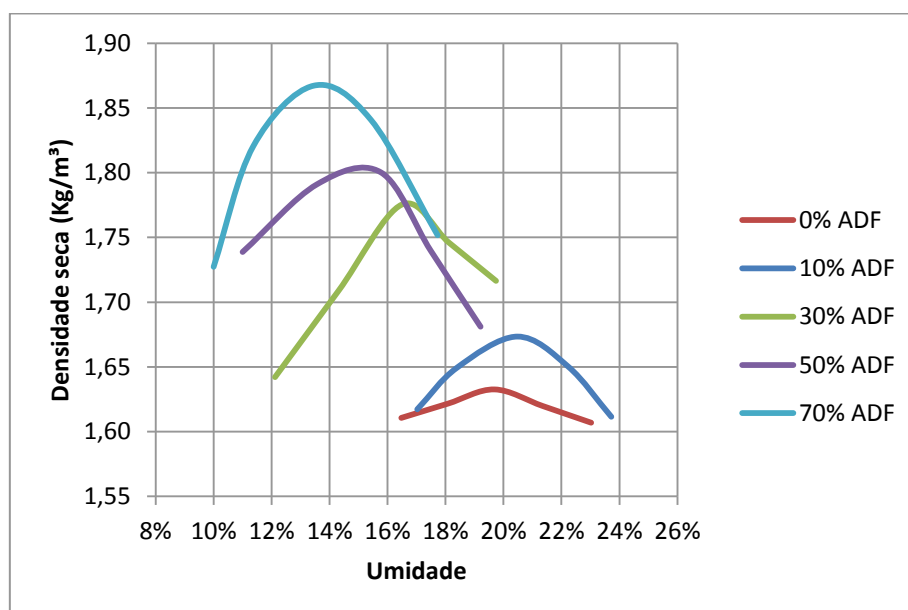
É possível observar que à medida que a areia de fundição é acrescida, as curvas deslocam-se para a esquerda e para cima, assim como se tornam mais sensíveis as variações de umidade. Essa tendência também é observada em outros estudos, como em Domingues (2015), Klinsky (2013), Teixeira (2014) e Sharma e Gupta (2013).

Gráfico 23 - Curvas de compactação (Energia normal)



Fonte: O autor

Gráfico 24 - Curvas de compactação (Energia intermediária)



Fonte: O autor

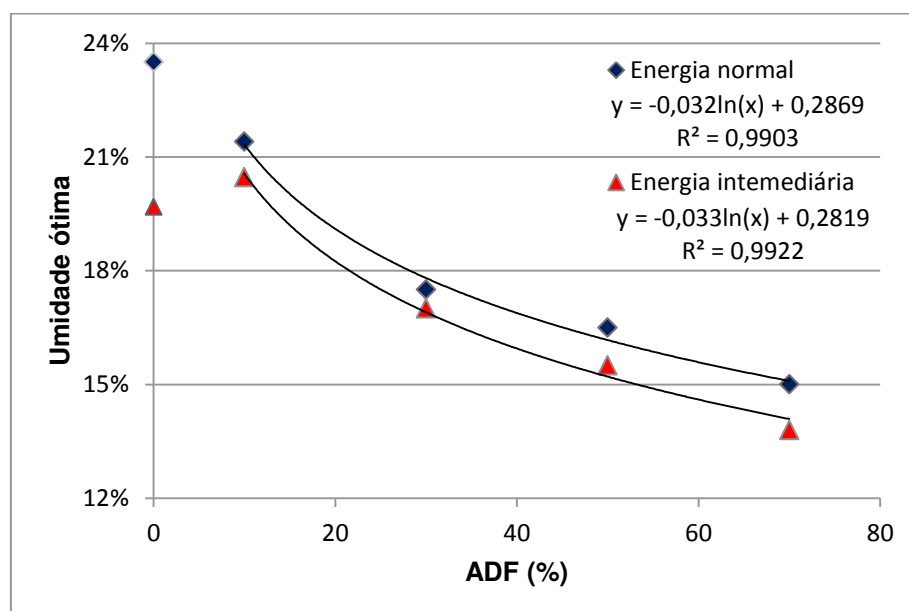
Essa característica é explanada por Pinto (2006), onde descreve que solos siltosos e argilosos, frequentemente apresentam valores baixos de densidade seca máxima e umidade ótima alta, com curvas de compactação bem abatidas, enquanto que o inverso é representativo das areias.

O motivo para tal é explicado pelo fato de que à medida que a amostra vai apresentando uma curva granulométrica mais graduada, as partículas de menor diâmetro do solo vão preenchendo os vazios entre as partículas de areia de fundição. Com isso, reduz o índice de vazios da mistura, uma vez que favorece o entrosamento entre as partículas e conseqüentemente obtêm-se valores de densidade seca máxima maiores que o solo puro.

A umidade ótima decresce devido a menor necessidade de água para lubrificar as partículas de areia, que tem sua área específica menor.

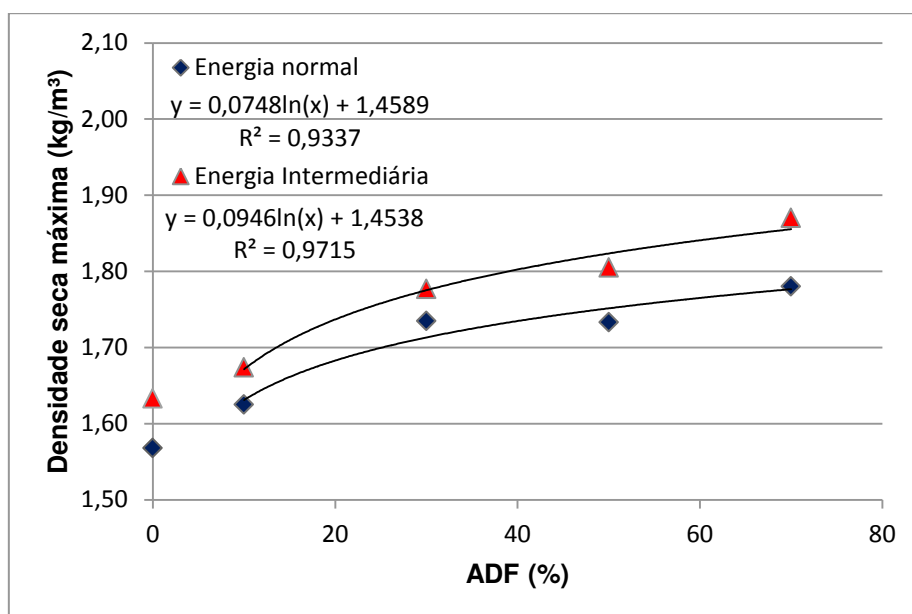
Nos Gráficos 25 e 26 são apresentadas as variações da umidade ótima e densidade seca máxima, de acordo com o percentual de ADF presente nas amostras.

**Gráfico 25 - Variação da umidade ótima em relação à porcentagem de ADF**



Fonte: O autor

Gráfico 26 - Variação da densidade seca máxima em relação à porcentagem de ADF



Fonte: O autor

Observa-se que os gráficos apresentam um padrão de comportamento bem definido para as duas energias, diminuindo continuamente o valor da umidade ótima e aumentando a densidade seca máxima até alcançar a mistura solo+70% de ADF.

Assim como feito por Sharma e Gupta (2013), foram traçadas linhas de tendência para as variações de densidade seca máxima e umidade ótima com o acréscimo de ADF, as linhas representativas são expressas a partir de funções logarítmicas de base e, logaritmo natural.

A similaridade entre as tendências mostra que no caso das misturas, a variação da umidade ótima e densidade seca máxima, pouco depende da energia de compactação.

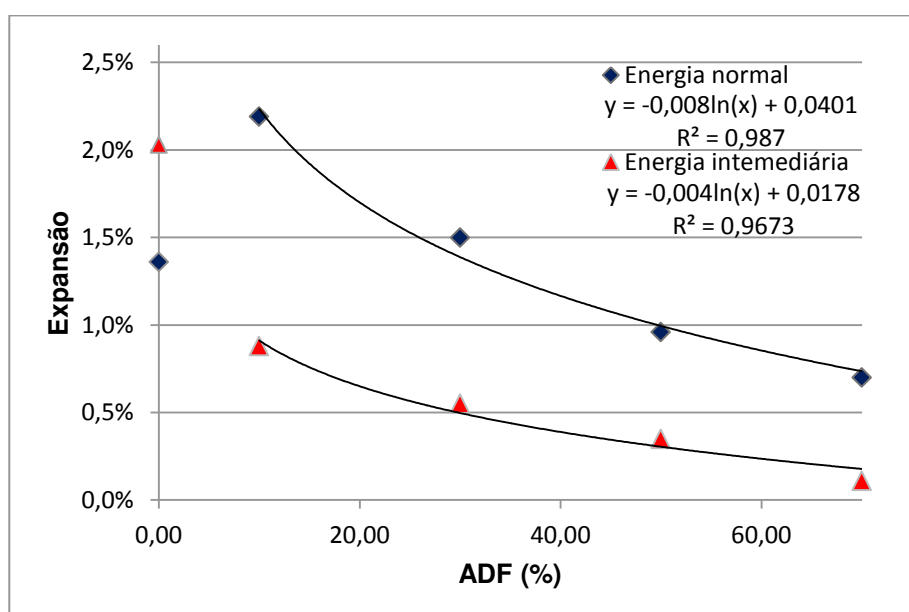
Cabe salientar que os pontos experimentais obtidos apenas com solo não foram considerados para determinação das tendências, já que estas se referem unicamente as misturas. Percebe-se que a umidade ótima do solo puro, quando compactado em energia normal, pode ser congregado por este modelo. Contudo, isto não é possível quando sob energia intermediária de compactação, já que a umidade ótima mostra-se “discrepante” com relação à tendência.

Este resultado foi confirmado por meio da repetição do ensaio de compactação no solo puro sob energia intermediária. A repetição indicou os mesmos resultados encontrados quando do primeiro ensaio.

### 5.2.2 CBR (California Bearing Ratio) e Expansão

A expansão dos corpos de prova de solo e mistura solo-ADF foi medida após quatro dias (96 horas) de imersão. Os resultados obtidos são mostrados no Gráfico 27.

Gráfico 27 - Variação da expansão em relação à porcentagem de ADF



Fonte: O autor

Conforme exposto, fica evidente que a expansão cai de 1,36 para 0,7% na energia normal e de 2,03 para 0,2% na energia intermediária. A linha de tendência mostra ainda que a expansão tende a zero para maiores percentuais de ADF. Esta redução da expansão é mais expressiva até 50%, já que após este valor as variações tornam-se menos sensíveis. O mesmo fenômeno é exposto por Mgangira(2006), Klinsky (2013) e Teixeira (2014).

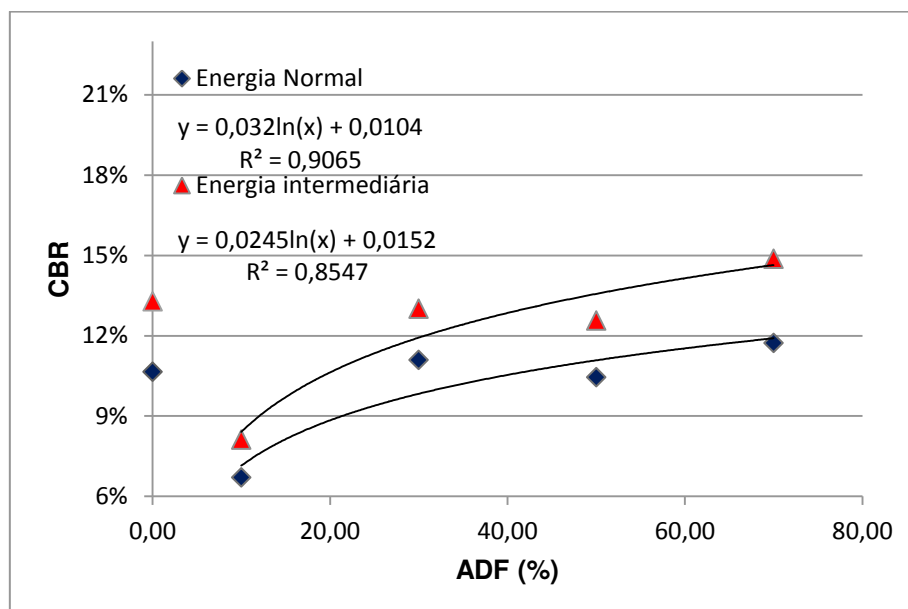
De acordo com Louafi e Bahar (2012) a redução da expansão pode ser explicada pelo fato de que as partículas de argila e silte, que podem se mostrar

expansivas, são substituídas pela adição da ADF, que é normalmente um material inerte.

Cabe citar o que ocorre quando 10% e 30% de ADF são adicionados ao solo. No caso do solo compactado sob energia normal, a adição de ADF nestes teores promove um aumento da expansão do solo se comparado ao que se observa no solo puro. Não está claro o motivo para tal, sendo recomendado um estudo futuro mais detalhado deste caso. Quando empregada energia intermediária a mistura mostra-se sempre menos expansiva que o solo puro.

Os resultados da adição de ADF referente ao CBR são mostrados no Gráfico 28.

**Gráfico 28 - Variação do CBR em relação à percentagem de ADF**



Fonte: O autor

Com relação ao CBR, nota-se que as modificações em ambas as energias de compactação não foram bruscas em relação ao valor do solo puro. Isto significa dizer que a adição de ADF ao solo não resulta em ganhos de índice de suporte, pelo contrário, a adição de 10% de ADF provoca uma queda brusca, em aproximadamente 4 unidades, apresentando um CBR de 6,71 em comparação com 10,65 medido no solo puro. O mesmo se observa sob a energia intermediária, em que a redução é ainda maior. As misturas com 30%

ou mais de ADF tem CBR similar ao valor de referência (solo puro) ou até mesmo superior.

Tratando-se da energia normal, o teor de maior suporte foi o de 70% de ADF com CBR de 11,72%. Na energia intermediária o teor de maior suporte foi de 14,87%, enquanto o de menor foi de 8,12%, quando com 10% de ADF.

Não foram encontradas na literatura explicações claras para a causa da queda do CBR, embora resultados similares já tenham sido reportados por Teixeira (2014) e Mgangira(2006).

Assim como Klinsky (2013) e Teixeira (2014), conclui-se que a ADF, por ser inerte, não provocou claro aumento da resistência do solo.

No presente trabalho observou-se que o comportamento variável em termos de CBR pode ser explicado pela dificuldade na homogeneização das amostras, ora tendo maior quantidade de partículas de ADF em contato com o pistão e outrora as partículas do solo base.

Assim como feito para umidade ótima e densidade seca máxima, foram traçadas linhas de tendência para a expansão e CBR, verificando que, igualmente, as alterações com o acréscimo de ADF seguem a tendência do logaritmo natural.

A Tabela 13 expõem as propriedades das amostras em ambas às energias representadas por equações de aproximação com seus respectivos coeficientes de correlação.

**Tabela 13 - Equações de aproximação**

<b>Energia Normal</b>	Umidade ótima	$W_{\phi} = -0,032\ln(\%ADF) + 0,2869$	$R^2 = 0,990$
<b>Energia Intermediária</b>		$W_{\phi} = -0,033\ln(\%ADF) + 0,2819$	$R^2 = 0,992$
<b>Energia Normal</b>	Densidade seca máxima	$\gamma_{m\acute{a}x} = 0,0748\ln(\%ADF) + 1,4589$	$R^2 = 0,934$
<b>Energia Intermediária</b>		$\gamma_{m\acute{a}x} = 0,0946\ln(\%ADF) + 1,4538$	$R^2 = 0,972$
<b>Energia Normal</b>	Expansão	$Exp. = -0,008\ln(\%ADF) + 0,0401$	$R^2 = 0,987$
<b>Energia Intermediária</b>		$Exp. = -0,004\ln(\%ADF) + 0,0178$	$R^2 = 0,967$
<b>Energia Normal</b>	CBR	$CBR = 0,032\ln(\%ADF) + 0,0104$	$R^2 = 0,906$
<b>Energia Intermediária</b>		$CBR = 0,0245\ln(\%ADF) + 0,0152$	$R^2 = 0,855$

Fonte: O autor

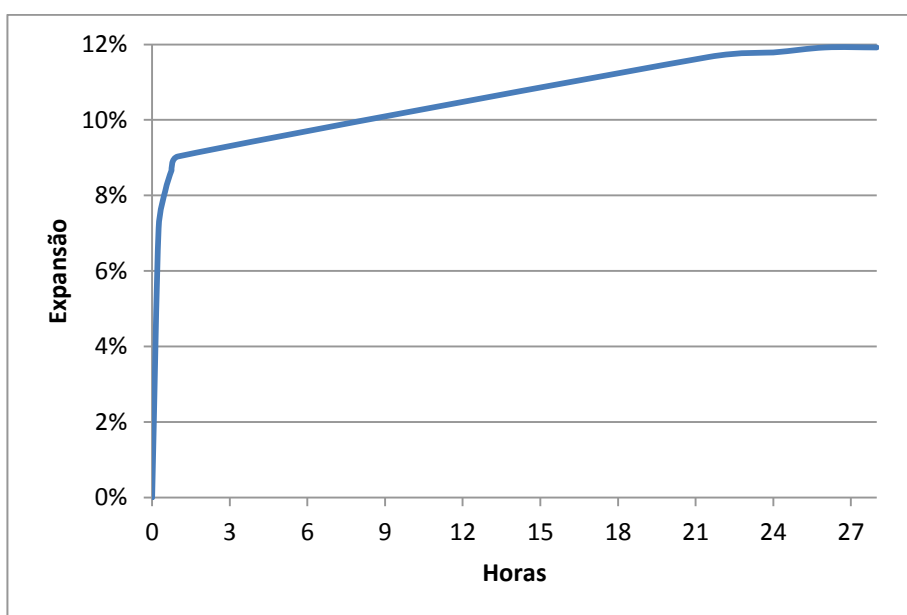


### 5.2.3 Expansibilidade LNEC do Solo Residual de Gnaisse

O resultado obtido de expansibilidade dos materiais passantes na peneira 0,42 mm foi de 11,92%, conforme exibido no Gráfico 29. De acordo o Laboratório de Engenharia Civil de Cabo Verde (LEC, 2012), é considerado solo expansivo aquele que exibe índice de expansibilidade superior a 8 %.

Em vista disso, é confirmado o exposto pelo ensaio de CBR, comprovando o caráter expansivo do solo Residual de Gnaisse sob a influência da água.

Gráfico 29 – Variação da expansão em relação ao tempo



Fonte: O autor

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Com base nos dados obtidos, por meio de ensaios em amostras preparadas com diferentes porcentagens de areia de fundição incorporada ao solo siltoso, concluiu-se que a estabilização de solos expansivos com a reutilização de areia de fundição é possível, tal qual reportado nos estudos realizados por Mgangira (2006), Louafi e Bahar (2012), Klinsky (2013), Sharma e Gupta (2013), Teixeira (2014) e Domingues (2015).

Os ensaios de CBR e expansão LNEC confirmaram a natureza expansiva do solo residual de gnaiss estudado neste trabalho. No caso do ensaio de CBR a expansão é mais baixa porque a amostra apresenta todas as frações granulométricas, sendo também composta por materiais não expansivos, diferente do LNEC, que ensaia apenas a parcela de silte e argila.

Foi possível analisar que a adição de ADF promove mudanças na granulometria da mistura fazendo com que as curvas de compactação se tornem mais sensíveis à umidade e atinjam maiores valores de densidade seca máxima.

Outra observação se diz respeito à redução da variação volumétrica, onde é crescente com o aumento do teor de ADF incorporado ao solo. Porém, vale ressaltar, que a diminuição da expansibilidade do solo em questão, vem acompanhada da instabilidade da resistência do mesmo, que apresentam variações oscilatórias do CBR.

Uma análise conjunta das caracterizações físicas e mecânicas indicaram mudanças nas características das misturas estudadas, mostrando que a adição de 70% de ADF conduz ao melhor desempenho deste material quando utilizado como camada de suporte, já que ocorre a maior redução da expansão e o maior aumento do CBR.

Para que o reaproveitamento da areia de fundição residual tenha sucesso, além de assegurar mudanças positivas nas propriedades, a mistura deve ser também economicamente e ambientalmente viável. Com relação à economia, há amostras de que a areia de fundição traga benefícios, pois a mistura de solo e ADF tornaria viável a reutilização de solos expansivos locais

e reduziria os gastos com descarte do material. Outro importante ponto se diz respeito à exploração desnecessária de recursos naturais adicionais, diminuindo os custos na aquisição de material qualificado para obras de aterro compacto, caso as siderúrgicas forneçam a um preço acessível ou gratuitamente o resíduo. Isto reduz também os passivos ambientais decorrentes da exploração de jazidas de solo.

Conclui-se também que é possível solucionar parcialmente o problema encontrado pelo setor siderúrgico para descartar a areia de fundição, permitindo com o tempo, reduzir, ou até mesmo eliminar a necessidade de utilização de aterros sanitários para disposição destes materiais.

## 6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

No desenvolvimento deste trabalho foram observados alguns pontos que poderiam ser explorados para confirmar a validade do emprego de areia de fundição e melhor caracterizar o comportamento das misturas de solo. Sugere-se, portanto, as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Ensaiar outros solos expansivos e estudá-los com uma maior variação de teores de areia de fundição;
- Sugere-se a adição de pequenas quantidades de outros aditivos, com o intuito de aumentar a capacidade de suporte do solo e complementar à estabilização realizada pela ADF;
- Adotar uma maneira mais eficiente de homogeneizar as amostras, podendo assim, prevenir possíveis erros;
- Ensaios sob a energia modificada.
- Fazer uma análise da viabilidade econômica, levando em conta o custo de preparação da mistura solo+%ADF, o custo de armazenamento, se necessário, e os custos de transporte de entrega, em função da distância da fonte de fundição de resíduos de areia para a área de aplicação;
- Executar aterros experimentais de modo que sejam possíveis medições de campo confiáveis pra avaliar o real comportamento dos solos expansivos e o potencial poluente real das areias.

## REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_ (1986) NBR 6457 – **Amostras de solo** – Preparação para ensaios de compactação e ensaios e caracterização.

\_\_\_\_\_ (1995) NBR 6502 – **Rochas e solos**.

\_\_\_\_\_ (1894) NBR 7181 – **Análise granulométrica dos solos**.

\_\_\_\_\_ (1984) NBR 6459 – **Solo: Determinação do limite de liquidez**.

\_\_\_\_\_ (1984) NBR 7180 – **Determinação do limite de plasticidade**.

\_\_\_\_\_ (1984) NBR 6508 – **Determinação da massa específica** – Diretrizes para Aplicações Geotécnicas Confinadas e Construção Civil. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ (1986) NBR 7182 – **Ensaio de compactação**.

\_\_\_\_\_ (1987) NBR 9895 – **Solo: Índice de Suporte Califórnia**.

\_\_\_\_\_ (1994) DNER-ME 029 – **Solo – determinação de expansibilidade**.

ABIFA - **Associação Brasileira de Fundição**. Disponível em: <http://abifa.org.br/>. Acesso em 11/jun 2015.

ACQUAPLANT, **Relatório numero 00840**. 21 de Agosto de 2015.

ASTM Standard D4829. 2011. **Standard Test Method for Expansion Index of Soils**. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D4829-11. Disponível em: <www.astm.org>. Acesso em 11/jun 2015.

AFS – **American Foundry Society**. Disponível em: <http://www.afsinc.org/>. Acesso em 11/jun 2015.

BAPTISTA, C. F. N. (1976) **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edicao, Editora Globo, Porto Alegre.

BRASIL. **Resolução CONSEMA n° 26**, de 06 de setembro de 2013. Diretrizes sobre a utilização das Areias Descartadas de Fundição – ADF. Publicado no D.O.U de 16 setembro 2013.

CAPUTO, H. P. (1988). **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. vol.1, 6.ed., rev. e ampl. – [Reimpr.]- Rio de Janeiro: LTC, 2015. 248p.

CARNIN, Raquel L. P. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em mistura asfálticas**. Tese ao curso de pós graduação em química, 2008.

CERRI, L.E.S. & AMARAL, C.P. **Riscos geológicos**. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998.

CHEGATTI, S; CARNIN, R; MAÇANEIRO, P.. **Processo de reuso de areia descartada de fundição na fabricação de vidro**. ABIFA, 2014. Disponível em: <<http://abifa.org.br/wp-content/uploads/2014/09/ABIFA-171-agosto.pdf>>. Acesso em 06. jun 2015.

CHEN, F. H. (1988). **Foundations on expansive soils**, Elsevier Science Publishers B. V

COSTA, L.F.C. **Estudo de solo de alteração do jurássico superior: Caracterização geotécnica e melhoramento por cal e cimento**. Dissertação de mestrado em Geologia Aplicada, especialização em Geologia de Engenharia, Lisboa, 2015.

CASOTTI, Bruna Pretti; FILHO, Edmar Del Bel; CASTRO, Paulo Castor. **Indústria de fundição: situação atual e perspectiva**. Artigo, 2011.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**/Braja M. Das; tradução EZ2Translate; revisão técnica Leonardo R. Miranda. – São Paulo : Cengage Learning, 2011.

DNIT (2006). **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR-179. Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes, Rio de Janeiro.

DOMINGUES, Luciene Gachet Ferrari, 1985- **Viabilidade ambiental e econômica da utilização de areia descartada de fundição (ADF) na cobertura de aterros sanitários** – Limeira, SP:[s.n.], 2015.

FERREIRA, S. R. M. (1995). **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação**. Tese (Doutorado) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 401 p.

FERREIRA, K; PADULA, F; SILVA, S. **Gerenciamento de Resíduo em Indústrias de Biomateriais**. 2012.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. **Banco de Dados GEOBANK**. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>> Acesso em 12/nov 2015.

GUIDA, H.N., **Estabilização de um solo fino lateríticos pelo ácido fosfórico**. Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1971.

GOPAL RANJAN, A S R Rao. **Basic and Applied Soil Mechanics**. 2nd ed. India: New Age International, 2007, 774 p.

GONDIM, L. M. 2008. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. Dissertação 171 de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 fl.

GOVEA, C; WINCZKIEWICZ, M. **Processo de reuso de areia descartada de fundição na fabricação de vidro**. ABIFA, 2014. Disponível em: <<http://abifa.org.br/wp-content/uploads/2014/09/ABIFA-171-agosto.pdf>>. Acesso em 06. jun 2015.

Gutiérrez Klinsky, Luis Miguel. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos**. 2013. Tese(Doutorado). Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

HERMENEGILDO, Manuela K. **Determinação da concentração de metais presentes em areia verde de fundição: Estudo de caso da Fundição TUPY S.A.** Trabalho de conclusão de curso, 2011.

JONES, D.E. and Holtz, W.G. 1973. **Expansive soils** – the hidden disaster. Civil Eng., ASCE, New York, NY pp 87-89, Aug. 1973.

KLINSKY, L. M. G. e G. T. P. Fabbri (2009) **Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis**. Transportes, v. 17; n. 2; p. 36–45.

KUMAR, A.; SHARMA, K. R.; SINGH, B. **Compaction and sub-grade characteristics of clayey soil mixed with foundry sand and fly ash and tile wast**. Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 2014. Disponível em: < <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/ICAET-2014/ce/volume-2/1.pdf?id=7622>> Acesso em 3. jun 2015.

Laboratório de Engenharia Civil de Cabo Verde (LEC). **Estudo geotécnico de um terreno situado em Mindelo**, 2012

LITTLE, A.L. (1969) **The engineering classification of residual tropical soils**. In: Proc. of 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico.

LOUAFI, B.; BAHAR R. **Sand: Na additive for stabilization of swelling clay soil**. International Journal of Geosciences, 2012.

MACÊDO, M.M., **Solos modificados com cimento** – Efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos. Dissertação de M.Sc., CTG. Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

MAHLER, C.F., **Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos**. Dissertação de D.S.C. COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, 1994.

MARIOTTO, C. L., **Regeneração de areias**: uma tentativa de discussão temática. Revista Fundação & Matérias-primas. 42.ed. São Paulo, 2000.

MEDINA, J. **Apostila de Estabilização de Solos** – COPPE/UFRJ. 1987

MGANGIRA, Martin B.. **Laboratory assessment of the influence of the proportion of waste foundry sand on the geotechnical engineering properties of clayey soils**, JOURNAL OF THE SOUTH AFRICAN INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERING, Vol 48 No 1, March 2006, Pages 2–7, Paper 563, Disponível em [http://saice.org.za/downloads/journal/vol48-1-2006/vol48\\_n1\\_a.pdf](http://saice.org.za/downloads/journal/vol48-1-2006/vol48_n1_a.pdf)

MILITITSKY, Jarbas, CONSOLI, Nilo Cesar, SCHNAID, Fernando. **Patologia das fundações**. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

New York State Division of Homeland Security and Emergency Services (NYS DHSES). 2014. **New York State Standard Multi-Hazard Mitigation Plan Draft, Section 3.13: Land Subsidence and Expansive Soils Hazard**. Disponível em: < <http://www.dhses.ny.gov/oem/mitigation/documents/2014-shmp/2014-SHMP-full.pdf>>. Acesso em 10. jun 2015.

OLIVEIRA, L. C., **A Estabilização de Solos Aplicada a Habitação**, Um Estudo de Misturas SoloCimento. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994

PINTO, A.R.A.G., 2008. **Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 103p

PINTO, Carlos de Sousa, **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aula/3ª Edição**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

QUISSINI, C. S. **Aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos**. 2009, 84f. Dissertação (Programa de pós-graduação em Materiais) Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS.

REALE, Miguel. **Compaction and Sub-grade Characteristics of Clayey Soil Mixed with Foundry Sand and Fly Ash and Tile waste**, Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), International Conference on Advances in Engineering & Technology – 2014, Disponível em <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/ICAET-2014/ce/volume-2/1.pdf?id=7622>

REUBEN H. Karol. **Chemical Grouting And Soil Stabilization**, Revised And Expanded (Civil and Environmental Engineering), 3rd ed. New York: Marcel Dekker, Inc. 2003,p.584

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., **Estabilização dos solos com cal e betume**. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, Santos – São Paulo, Abril, 1995.

SCHNAID F.; MILITITSKY J.; CONSOLI, N. C. **Patologia das Fundações**. São Paulo, 2005. Ed. Oficina de Textos. 207 Pag.

SHARMA, K. R.; GUPTA C. **Influence of waste materials on geotechnical characteristics of expansive soil**. International journal of engineering research e technology – 2013

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3rd ed. New York: John Willey & Sons, Inc, 1996.

TEIXEIRA, Ivonei. **Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento**. 2014. 167 f. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas – Campinas, SP

VILLIBOR, Douglas Fadul. **Estabilização granulométrica ou mecânica**. 1982. 57 f. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982

VOGT, J.C., **Estabilização Betuminosa**. In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro. Julho, 1971.