

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

GIOVANNI BRIGHENTE SILVEIRA

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE AREIAS  
DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO ESTABILIZADAS COM CIMENTO

Joinville

2022

GIOVANNI BRIGHENTE SILVEIRA

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE AREIAS  
DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO ESTABILIZADAS COM CIMENTO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Marcelo Heidemann

Joinville

2022

GIOVANNI BRIGHENTE SILVEIRA

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE AREIAS  
DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO ESTABILIZADAS COM CIMENTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 18, de março de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Marcelo Heidemann  
Orientador/Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof<sup>a</sup> Dra. Helena Paula Nierwiski  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Julián Asdrubal Buriticá Garcia  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer;

Aos meus pais Maristela e Manoel que me deram apoio emocional e financeiro, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço;

Aos meus pastores Ivanir, Teresa, Theophilo Larissa, pelas orações e conselhos nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Santa Catarina especialmente ao departamento de Engenharias da Mobilidade por possibilitar a execução deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Heidemann, que nunca se cansou de me ajudar, até mesmo fora de horário, à Profa. Dra. Vanessa, sempre disponível e atenciosa para ajudar na correção deste trabalho, ao Prof. Dr. Daniel Hastenpflug por auxiliar nos ensaios de laboratório, à minha tia Profa. Dra. Inês Costa Brighente, que também me auxiliou fazendo correções deste texto;

Aos colegas Ruan, Cláudio, Mariane e Eduardo por também auxiliarem nos ensaios e aos colegas Túlio e Murilo pela parceria durante a graduação;

Ao meu amigo Daniel e sua família que tantas vezes me receberam em sua casa, como um membro da família, possibilitando a conclusão destes ensaios.

Enfim, agradeço a todos que de maneira direta ou indireta me auxiliaram durante a realização deste TCC.

"Ora, a fé é a certeza de coisas que se esperam, a convicção de fatos que se não vêem." Hebreus 11:1

## RESUMO

A geração de areia descartada de fundição (ADF) no Brasil é significativa, sendo produzido mais de 3 milhões de toneladas por ano. Apesar de a ADF possuir características interessantes para o emprego na construção civil e apresentar parâmetros que atendem os requisitos ambientais para a reutilização, a inexistência de normas específicas que instruem seu uso dificulta a aplicação. Dentre as possibilidades, está a utilização como substituto de outros agregados em grandes obras, sendo as de infraestrutura atraentes para o emprego das ADF, visto que, em sua maioria, demandam grandes volumes de material. Entretanto, as ADF nem sempre atendem os requisitos de resistência para aplicação em que as solicitações são mais significativas. Como forma de viabilizar seu uso mesmo em demandas que exigem elevado desempenho, o presente trabalho traz um estudo acerca da resistência à compressão simples de ADF tratadas com cimento. Para tal, foi realizada uma pesquisa experimental que compreendeu a moldagem de corpos de prova cilíndricos com a incorporação de cimento Portland de Alta Resistência Inicial em cinco diferentes proporções e a determinação da variação da resistência à compressão simples em corpos de prova com diferentes teores de cimento e com diferentes valores de razão porosidade-teor de cimento ( $\eta/Civ$ ), em três diferentes tempos de cura. Os corpos de prova submetidos aos ensaios geomecânicos foram moldados por compactação estática sob umidade ótima e densidade seca máxima correspondentes ao esforço de compactação normal. Foi possível observar um aumento unívoco de resistência a compressão simples com o aumento do teor de cimento, aumento do tempo de cura e redução da razão  $\eta/Civ$ . Os ajustes matemáticos indicaram boas correlações para ambas as metodologias de dosagens propostas. Foram observados significativos aumentos de resistência com a incorporação de cimento à ADF, chegando a ganhos próximos à 400% se comparadas adições de 3 a 15%. Por outro lado, nenhum dos teores de cimento testados conduziu a resistências superiores a 2,1 MPa após 7 dias de cura, que corresponde ao requisito de resistência estabelecido pela norma brasileira para solo-cimento a ser aplicado em camadas estruturais de pavimentos.

**Palavras-chave:** Areia de Fundição. Solo-Cimento. Estabilização de solos.

## ABSTRACT

The generation of waste foundry sand (WFS) in Brazil is significant, being produced more than 3 million tons per year. Although the WFS has interesting characteristics for use in civil construction and presents parameters that meet the environmental requirements for reuse, the lack of specific data that instruct its use makes its application difficult. Among the possibilities, there is the use as a substitute for other aggregates in large works. Infrastructure works are attractive for the use of WFS, since they demand large volumes of material. However, WFS do not always meet the strength requirements for applications where the stresses are most significant. To make its use feasible even in demands that require high performance, the present work presents a study on the simple compressive strength of WFS treated with cement. To this end, experimental research was carried out, comprising the moulding of cylindrical specimens with the incorporation of Portland cement of High Initial Strength in five different proportions and the determination of the variation of the unconfined compressive strength in specimens with different cement contents and with different values of porosity-cement content ratio ( $\eta/Civ$ ), in three different curing times. The specimens submitted to the geomechanical tests were moulded by static compaction under optimal humidity and maximum dry density corresponding to the normal compaction effort. It was possible to observe a univocal increase in the unconfined compressive strength with the increase of the cement content, increase of the curing time and reduction of the  $\eta/Civ$  ratio. Mathematical adjustments indicated good correlations for both proposed dosing methodologies. Significant increases in strength were observed with the addition of cement to the WFS, reaching gains close to 400% when compared to additions of 3 to 15%. On the other hand, none of the tested cement contents led to strengths greater than 2.1 MPa after 7 days of curing, which corresponds to the strength requirement established by the Brazilian standard for soil-cement to be applied in structural layers of pavements.

**Keywords:** WFS, Soil-Cement. Stabilization.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Primeira etapa da compactação.....	18
Figura 2 - Canais de descida (alimentação) na caixa de areia .....	19
Figura 3 - Despejo de metal no molde de areia .....	19
Figura 4-Influência do teor de finos (F) na resistência à compressão para diferentes teores de cimento .....	25
Figura 5 - Resistência à compressão simples em 3 índices de vazios diferentes .....	26
Figura 6 – Variação da Resistência à Compressão Simples da areia de Osório com a razão porosidade/cimento.....	29
Figura 7 - Variação dos valores de CBR e expansão com o teor de areia de fundição adicionado à matriz Jardim Botânico.....	31
Figura 8 - ADF usada neste estudo.....	36
Figura 9 - Curva Granulométrica da ADF utilizada.....	37
Figura 10 - Curvas de Compactação da ADF.....	37
Figura 11 - Evolução de resistência à compressão dos tipos de cimento Portland. ....	38
Figura 12- ADF úmida sendo pesada .....	42
Figura 13 - ADF misturada com cimento .....	42
Figura 14- Areia pesada para compactação da respectiva camada.....	43
Figura 15-Molde Bipartido .....	44
Figura 16 - Tarugo de Nylon .....	44
Figura 17 -Prensa Hidráulica.....	45
Figura 18 - Corpos de Prova Ensacados para preservação da umidade. ....	46
Figura 19 - CPs prontos para serem rompidos após ficarem 24 horas submersos em água .....	48
Figura 20 - CP na prensa para ser rompido .....	48
Figura 21 - Anel dinamométrico .....	49
Figura 22 - RCS x Teor de Cimento.....	53

Figura 23- Comparativo entre os resultados obtidos por Cruz (2007) e Autor (2022) .....	55
Figura 24 - RCS x $\eta/C_{iv}$ .....	56
Figura 25 – Comparativo entre Consoli et al (2010) e Autor (2022) para misturas solo-cimento aos 7 dias de cura.....	58

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Classificação de misturas de solo com cimento .....	24
Quadro 2- Expansão máxima admitida pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006).....	32
Quadro 3- Resumo das especificações da ABNT.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química da ADF .....	35
Tabela 2- Propriedades Geotécnicas Básicas da ADF.....	36
Tabela 3 - Índices físicos médios dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa.....	50
Tabela 4 - Estatísticas descritivas para as misturas utilizadas na pesquisa .....	50
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples [kPa] .....	51
Tabela 6 - Resistencia à Compressão Simples x Quantidade de Cimento [kPa] (Equações)...	53
Tabela 7 - Comparativo entre Cruz (2008) e Autor (2022).....	54
Tabela 8- Resistência à Compressão Simples x $\eta/C_{iv}$ [kPa].....	56
Tabela 9- Resistencia à Compressão Simples x $\eta/C_{iv}$ [kPa] (Equações).....	57
Tabela 10 - Comparativo entre Consoli et al (2010) e Autor (2022) .....	57

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição

ASTM – American Society for Testing and Materials

ADF – Areia Descartada de Fundação;

CBR – California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)

CC – Coeficiente de Curvatura

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

IP – Índice de Plasticidade

ISC - Índice de Suporte Califórnia

RCS – Resistência à Compressão Simples;

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## LISTA DE SÍMBOLOS

w – Umidade

SR – Saturação

$\gamma_d$ - Densidade seca

$\gamma_n$ - Densidade natural

$\gamma_s$ - Densidade natural

$q_u$ : Resistência a Compressão Simples

e – Índice de Vazios

$\eta$  – Porosidade

C – Teor de cimento em peso total de sólidos

$C_{iv}$ - Teor volumétrico de cimento

G – Densidade Real dos Grãos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1. OBJETIVOS .....	15
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO.....	17
<b>2.1.1 Processo de Fundição</b> .....	<b>17</b>
2.2 MELHORAMENTO DE SOLOS .....	20
<b>2.2.1 Estabilização de Solos</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2.2 Estabilização Química</b> .....	<b>21</b>
2.3 APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS DAS ADF .....	30
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1 MATERIAIS .....	35
<b>3.1.1 ADF</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1.2 Cimento</b> .....	<b>38</b>
3.2 METODOLOGIA.....	39
<b>3.2.1 Dosagem</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2.2 Moldagem</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2.3 Cura</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2.4 Ensaio de Resistência à Compressão Simples</b> .....	<b>47</b>
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>50</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CORPOS DE PROVA .....	50
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES X TEOR DE CIMENTO.....	51
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES X $\eta/C_{iv}$ .....	55
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>60</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As exigências da legislação ambiental têm levado muitas fundições a aumentarem os seus custos financeiros com o descarte de areias de moldagem em aterros especializados. Nas fundições, de uma maneira geral, são consumidas grandes quantidades de areia para a produção de moldes e machos. Sua utilização é feita por intermédio de diferentes processos: moldagem em areia verde, shell, cura a frio e outros, cada um deles tem peculiaridades e vantagens frente às necessidades da característica de produto que se quer obter. Os tipos de resíduos gerados e os processos de recuperação, regeneração ou descarte também apresentam particularidades (MORAES *et al.*, 2012).

Embora possam ser reutilizadas no próprio processo de moldagem em fundições, após alguns ciclos a areia se torna fina, devido à degradação térmica e deve ser, portanto, reposta para manter as propriedades requeridas pela atividade de fundição (CLEAN WASHINGTON CENTER, 1995 apud HEIDEMANN *et al.*, 2021). Calcula-se que para cada tonelada de metal fundido se produza aproximadamente uma tonelada de areia de fundição que precisa ser descartada (MCINTYRE *et al.* 1992 apud KLINSKY; FABRI, 2009). Santa Catarina é um estado com destaque nacional na geração de areias descartadas de fundição (ADF), e a cidade de Joinville por sua vez se destaca no cenário estadual. Segundo Carnin (2021), a produção anual de ADF no estado de Santa Catarina é estimada em aproximadamente 650 mil toneladas por ano, e na cidade de Joinville estima-se que acima de 500 mil toneladas por ano.

Segundo Yin *et al.* (2016), estima-se que 15 milhões de toneladas de ADF são geradas anualmente por operações de fundição (por exemplo, peças fundidas) nos EUA, das quais menos de 28% é reciclado e o restante é depositado em aterros. As estimativas são um tanto quanto incertas, uma vez que Torres *et al.* (2017) relata ser entre 6 e 10 milhões de toneladas a quantidade gerada, sendo apenas 15% reciclado.

Com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, através da Lei federal nº 12.305, de 2010, passou-se a ter uma preocupação maior com o descarte de resíduos sólidos, uma vez que é instituída a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. O uso das Areias Descartadas de Fundição veio a ser



regulamentado em Santa Catarina com a Lei Nº 17.479, de 15 de janeiro de 2018. Esta lei define que a utilização de ADF, na forma ambientalmente mais adequada, será destinada à produção de concreto asfáltico, de concreto e argamassa para artefatos de concreto, à fabricação de telhas, tijolos e outros artigos de barro cozido para artigos em cerâmica, ao assentamento de tubulações e de artefatos para pavimentação, base, sub-base, reforço de subleito para execução de estradas, rodovias, vias, urbanas e para cobertura diária em aterro sanitário.

As indústrias de fundição precisam estar em acordo com as legislações ambientais. A deposição das ADF em aterros sanitários onera as indústrias de fundidos, ao passo que obras de infraestrutura demandam o uso de agregados como areias, que tem sua extração cada vez mais limitadas por questões ambientais. Entretanto, como já reportado na literatura (HEIDEMANN *et al.*, 2021) as areias de fundição nem sempre apresentam desempenho geomecânico que atenda aos requisitos exigidos para camadas de pavimentos altamente solicitadas, como bases e sub-bases.

Neste sentido, o presente trabalho visa avaliar a possibilidade do melhoramento da resistência mecânica da ADF por meio da adição de cimento em ADF considerando seu uso como material em obras de infraestrutura, uma vez que o cimento adicionado à ADF tende a melhorar o desempenho geomecânico da mesma (Cruz, 2008).

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS), do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), fazendo-se a moldagem de corpos-de-prova e ruptura à compressão simples, depois de 7, 14 e 28 dias. A hipótese inicial assumida é que a incorporação de cimento à ADF melhore as propriedades geotécnicas da mesma.

## **1.1. OBJETIVOS**

Para colaborar com a viabilização do uso de ADF em obras geotécnicas e consequentemente com a resolução da problemática do passivo ambiental gerado pelo descarte de areia descartada de fundição (ADF) em aterros sanitários, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos:

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Avaliar a resistência à compressão simples de areias descartadas de fundição estabilizadas com diferentes teores de cimento visando o emprego de ADF-cimento como material para execução de camadas estruturais de pavimentos e propor equações de dosagem para misturas ADF-cimento.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Produzir corpos de prova de misturas de areia de fundição com cimento, com teores de cimento em peso de sólidos variando entre 3 e 15%
- Executar ensaios de resistência à compressão simples em corpos de prova curados durante 7, 14 e 28 dias;
- Calibrar curvas de dosagem a partir dos resultados obtidos na campanha experimental usando modelos já reportados na literatura.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesse capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica acerca das ADF e técnicas para estabilização de solos visando sua aplicação em obras de infraestrutura. Tais obras demandam que os materiais utilizados atendam adequadamente às exigências mecânicas, mas também ambientais.

### **2.1 AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO**

A fundição é uma atividade industrial fundamental para o desenvolvimento da história humana em vários sentidos. Através desta atividade são produzidas peças metálicas das mais variadas formas, tais como blocos de motores à combustão, utilizado na maioria dos automóveis, compressores hidráulicos e a ar, fogareiros, rolamentos, entre outros.

Porém essa atividade gera passivos ambientais, dentre os quais a produção e descarte da areia usada como molde, que deve possuir um destino adequado com a devida licença ambiental, concedida pelo órgão competente.

#### **2.1.1 Processo de Fundição**

O processo de fundição consiste em liquefazer um determinado metal e despejá-lo em um molde, que pode ou não ser de areia, para que a peça fundida assumo o formato desejado.

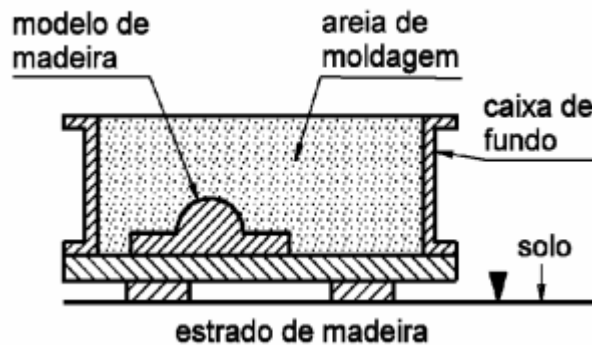
Segundo Moro e Auras (2007), existem muitos processos de fundição com molde de areia (aglomerada com cimento; com resinas de cura a frio; com resinas de cura a quente; com silicato de sódio, etc.), mas o mais conhecido e empregado é a fundição em areia verde.

O termo areia verde se refere às areias que utilizam ligantes a base de argila, enquanto as areias que contém ligantes orgânicos são denominadas areias quimicamente ligadas, resinadas ou de macharia (usadas na produção de machos) (ALVES, 2012). Ou seja, a denominação não decorre da coloração. Segundo Moro e Auras (2007), a composição do agregado granular refratário (molde) é feita por areia-base que pode ser sílica ( $\text{SiO}_2$ ), cromita ou zirconita, mais argila (como aglomerante) e água.

A indústria costuma usar areias que contenham grãos mais grosseiros, mas que proporcionem um bom acabamento superficial. Em relação aos ligantes e reagentes químicos, os mais utilizados são: resinas, bentonitas, pó de carvão, óxidos de ferro e ligantes de cereal (ADEGAS, 2007).

Os moldes utilizados na fundição são preparados compactando a mistura de areia numa caixa sobre um modelo com formato da peça a ser fundida (Figura 1). Tal processo pode ser mecanizável (MORO; AURAS, 2007).

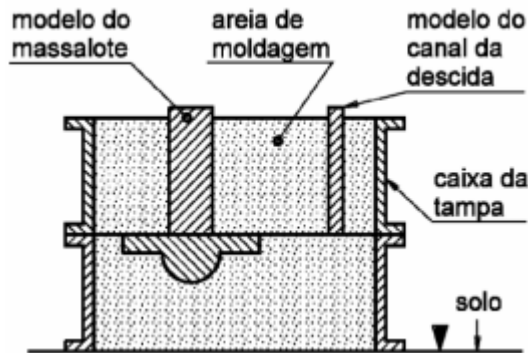
Figura 1- Primeira etapa da compactação



Fonte: Costa (2000)

Na caixa de areia vão também os canais de descida (Figura 2). Esses canais levam o metal fundido até o negativo do molde. Os canais são importantes para se certificar que todo o molde foi preenchido uniformemente, além de evitar deformidades na peça final (MASCARENHAS, 2016).

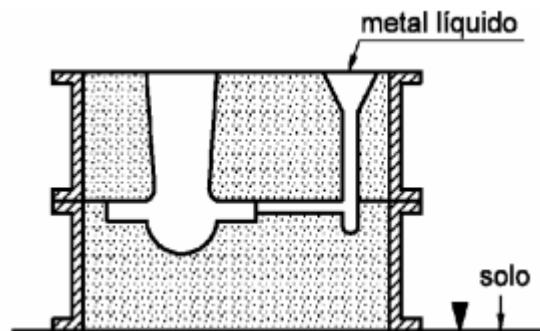
Figura 2 - Canais de descida (alimentação) na caixa de areia



Fonte: Costa (2000)

Posteriormente, o metal é despejado no molde de areia verde através do canal de descida, e por gravidade o metal desce e preenche todo o espaço do molde conforme apresentado na Figura 3 (MASCARENHAS, 2016).

Figura 3 - Despejo de metal no molde de areia



Fonte: Costa (2000)

Quando a peça a ser fundida apresenta detalhes internos ou cavidades, coloca-se no interior dos moldes de areia os machos, que devem ser compatíveis com o metal e com o tamanho da peça. Diferente do molde, que é uma peça em areia que delimita a parte externa do produto, o macho é uma peça em areia que delimita as partes internas (vazios). Após o vazamento do metal, o macho é retirado da peça, propiciando a forma interna almejada. (CASOTTI *et al.*, 2011)

A areia de moldagem corresponde ao maior volume de resíduos gerados pela indústria de fundição, com características quantitativas e qualitativas diferenciadas em função das peculiaridades de cada processo em particular (BIOLO, 2003 apud CHEGATTI, 2004).

Os resíduos que são provenientes da produção dos machos (areias de cura química, machos vazados e não vazados) possuem uma composição muito diversificada proveniente da mistura de resinas e catalisadores orgânicos, que nem sempre se conhece. Se a quantidade de resinas ligantes (poliuretânica ou fenólicas) for significativa, os resíduos apresentam um nível de toxicidade que os tornam perigosos (ADEGAS, 2007).

Para obtenção de moldes com propriedades adequadas, é necessário controlar a matéria-prima utilizada, saber a composição básica da areia e o grau de preparação da mistura, acompanhar o desempenho das máquinas de moldagem e tratamento de recuperação da areia. (ADEGAS, 2007)

Segundo Rodrigues *et al.* (2017), a principal razão do despejo é que quando é usada por muitas vezes a sua capacidade de resistência ao fogo é perdida, levando a perda de sua função ao processo de moldagem. Já CWC (1995) apud Heidemann *et al* (2021) reporta que com o uso a areia torna-se mais fina. De acordo com Adegas (2007), quanto mais finos os grãos, maior o número de grãos por grama, e conseqüentemente maior a área superficial. Isto faz com que haja maior adição de ligantes para um molde de mesmo tamanho. A partir deste momento, em que a areia deixa de ser própria para o uso nas fundições, ela deve ser levada para um local apropriado, como um aterro sanitário ou, para o uso em outra atividade que a possa usar, respeitando os requisitos técnicos, econômicos e ambientais.

As areias descartadas de fundição não podem ser descartadas livremente no meio ambiente, pois a sua disposição pode causar contaminação direta do solo devido à presença de metais e também contaminação os lençóis freáticos e o ambiente superficial circundante (PENKAITIS; SÍGOLO, 2012).

## **2.2 MELHORAMENTO DE SOLOS**

Melhoramento de um solo é uma definição aberta, pois há vários modos de fazê-lo. Seja pela incorporação um material ao solo a ser melhorado, adição de uma característica não existente, e dessa forma obter o resultado esperado ou apenas aplicar algum estímulo externo e melhorar alguma característica existente. (ROMANINI, 2017).

### 2.2.1 Estabilização de Solos

O termo estabilização de solos sugere que a incorporação de um novo material ou a condução de um processo pode tornar o material mais estável, melhorando seu desempenho frente às solicitações (ROMANINI, 2017). Diferentemente, a modificação visa melhorar a trabalhabilidade dos materiais, modificando os índices de consistência, sem ganhos significativos de resistência (NUÑEZ, 1991 apud GUÉRIOS, 2013). O tratamento, por sua vez, corresponde a técnicas que buscam descontaminar o solo através da diminuição da concentração e/ou toxicidade dos contaminantes (GUEDES *et al.*, 2010)

[...] a estabilização de solos é uma técnica através da qual se busca uma melhoria das características de comportamento do solo, especialmente em termos de resistência, deformabilidade, durabilidade e permeabilidade. A adição de cimento assim como a adição de cal ou materiais betuminosos representa um processo de estabilização físico-química do solo. (INGLES; METCALF, 1972 apud CANEPPELE, 2016, p. 21).

Baptista (1976) afirma que para estabilizar um solo, de um modo geral, pode-se utilizar um processo qualquer de natureza física, química ou mecânica. Romanini (2017) também adota esta classificação separa as técnicas em Estabilização Física, Mecânica e Química.

De acordo com Romanini (2017), o objetivo da estabilização física é fornecer uma característica física que o solo não possuía. Ao passo que segundo Onyelowe e Okafor (2012) o objetivo da estabilização mecânica é misturar os solos disponíveis para que, quando devidamente compactados, eles possuam a estabilidade desejada.

### 2.2.2 Estabilização Química

A estabilização química se dá através da adição de aditivos químicos, sejam eles Cimento, Cal, Betume, Bentonita, entre outros. Busca-se através dela a melhoria das propriedades físicas e mecânicas, possibilitando o emprego nas situações desejadas. As melhorias requeridas tipicamente referem-se à plasticidade e trabalhabilidade, resistência e deformabilidade, e principalmente melhorar o CBR (ROMANINI, 2017).

Segundo Romanini (2017), diversos materiais são utilizados para a estabilização de solos, como o cimento e a cal. No entanto, para fins ambientais, a bentonita exerce papel

predominante. Daniel (1993) apud Romanini (2017) recomenda a utilização de estabilização com bentonita em locais onde o solo apresenta-se inadequado para a construção de barreiras impermeáveis. A incorporação de bentonita, uma argila expansiva, atua de forma a reduzir os valores de condutividade hidráulica.

### 2.2.3.1 Solo-Cal

Esta técnica é fundamentada em reações físicas e químicas que ocorrem entre a cal e os constituintes do solo, seja por modificação ou estabilização. A modificação acontece devido à troca de cátions de cálcio, fornecidos pelo hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou cal hidratada) por cátions presentes no solo argilomineral, incitadas por um ambiente de pH elevado e promovida pelo sistema cal-água. Esse processo também conhecido como troca catiônica e é em parte responsável pela mudança da textura do solo, causada pela floculação de partículas de argila (LITTLE, 1999 apud BRITO; PARANHOS, 2017).

Existem essencialmente duas formas de melhorar o solo através da adição da cal: modificação e estabilização. A modificação ocorre principalmente devido à troca de cátions de cálcio fornecidos pela cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou cal hidratada) para o cátion normalmente presente adsorvido na superfície do argilomineral. A modificação também é causada porque a cal hidratada reage com a superfície do argilomineral no ambiente de alto pH promovido pelo sistema cal-água. No ambiente de pH elevado, a mineralogia da superfície da argila é alterada à medida que reage com os íons de cálcio para formação de produtos cimentícios (LITTLE, 1999).

A estabilização, por sua vez, é um processo de longo prazo, decorrente da formação de silicatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados, produzidos a partir das reações pozolânicas entre o cálcio da cal e os aluminatos e silicatos solubilizados no solo argilomineral. Estas reações dependem de ambientes com pH elevado e da reatividade do solo, ademais elas podem proporcionar a melhoria da capacidade de suporte e resistência mecânica do solo (LITTLE, 1999 apud BRITO; PARANHOS, 2017).

A estabilização ocorre quando a quantidade adequada de cal é adicionada a um solo reativo. Um nível significativo de ganho de resistência é desenvolvido através de uma reação pozolânica de longo prazo. Essa reação pozolânica é a formação de hidratos de silicato de cálcio



e hidratos de aluminato de cálcio à medida que o cálcio da cal reage com os aluminatos e silicatos solubilizados da superfície do mineral argiloso. Pesquisas mostraram que a reação pozolânica a termo pode continuar por muitos anos - desde que haja cal suficiente e o pH permaneça alto (>10) (LITTLE, 1999).

Ao contrário do cimento, que é recomendado para o tratamento de solos arenosos e de baixa plasticidade, a cal é recomendada para solos argilosos. Solos com média a alta plasticidade são mais reativos a cal, a qual aumenta a trabalhabilidade, diminui a expansão volumétrica e aumenta a resistência (USACE, 1994 apud JOHANN, 2013).

Segundo Mitchell (1981), o tratamento com cal com concentração de 3 a 8% do peso seco são característicos para solos plásticos e finos de baixa graduação. Romanini (2017) afirma que o solo melhorado com cal recebe adição de 0,5% até 2%, visando modificar a plasticidade e sensibilidade em relação à água. A estabilização do subleito consiste em adicionar no próprio subleito quantidade de 3 até 6% e a estabilização das camadas do pavimento com teores menores, de 2 a 4%, em virtude de os materiais já serem selecionados.

O emprego de misturas solo-cal em obras de pavimentação é normatizado no Brasil pela NORMA DNIT 420/2019 Pavimentação – Sol-Cal – Adição de cal para Estabilização de camada de Base – Especificação de Serviço.

### **2.2.1.2 Solo-Cimento**

A estabilização de solos com cimento refere-se à mistura homogênea entre o solo, o cimento e a água, posterior compactação e cura. A dosagem usada geralmente é determinada a partir de ensaios padronizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pela NBR 12253/93 Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento (FRANÇA, 2003 apud BRITO; PARANHOS, 2017).

O cimento é um aglomerante hidráulico, considerado um agente estabilizador de solos primário porque não depende dos minerais disponíveis no solo, depende apenas da presença de água, e esta por sua vez está disponível na maioria dos solos. Esta é uma das razões pela qual o cimento pode ser usado para provocar a ação estabilizadora necessária em vários tipos de solos (MAKUSA, 2013 apud BRITO; PARANHOS, 2017).

De acordo com Mitchell (1981) apud Consoli *et al.* (2013), o tratamento com cimento Portland com concentração de 3 a 10% do peso seco se adequa bem com solos arenosos e de baixa plasticidade.

As propriedades da superfície externa afetam mais fortemente o comportamento químico dos materiais do que qualquer outra propriedade. Isso é esperado, uma vez que a superfície que um sólido apresenta a um líquido, gás ou outro sólido consiste, na verdade, de uma barreira ou série de barreiras que devem ser penetradas antes que as reações químicas possam ocorrer (LAGUROS, 1962).

É difícil estabilizar com cimento de certos solos orgânicos porque o valor de pH reduzido desses solos causa a precipitação de um gel de alumina-sílica sobre as partículas de cimento e inibe o processo normal de endurecimento (MCLEAN; SHERWOOD, 1961 apud LAGUROS, 1962).

A determinação do adequado teor de cimento baseia-se no fato de que os solos misturados com pequenas quantidades de cimento, quando devidamente compactados e curados, melhoram sensivelmente as suas características originais de resistência mecânica, tornando-as muito superiores às de outros materiais utilizados normalmente como camadas de pavimentos (ABCP, 2004).

Segundo DNIT (2006), denomina-se mistura solo-cimento, as misturas que contenham porcentagens de cimento que variam de 6% a 10%, ao passo que misturas com adição de 4% a 6% de cimento são denominadas solo estabilizado com cimento e quando o teor é de 2% a 4%, solo melhorado com cimento, conforme o Quadro 1:

Quadro 1 - Classificação de misturas de solo com cimento

<b>Denominação</b>	<b>Teor de Cimento (%)</b>
Solo Melhorado com Cimento	02-04
Solo Estabilizado com Cimento	04-06
Solo – Cimento	06-10

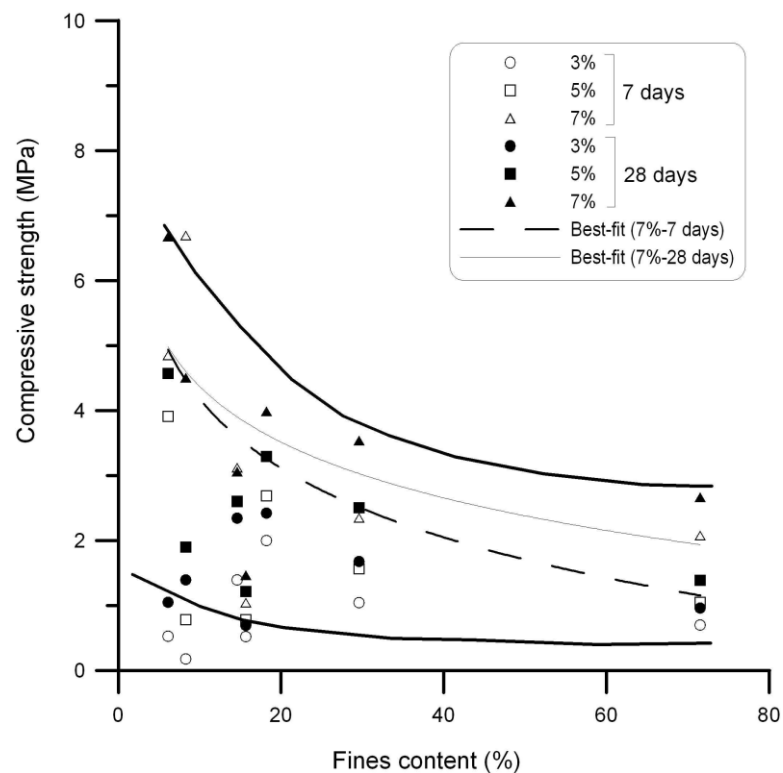
Fonte: Autor (2022)

A utilização de misturas solo-cimento tem sido cada vez mais frequente. Primeiramente, elas foram usadas como material de melhoramento para a estabilização de sub-bases na fundação de estradas (MARSELLOS *et al.*, 1986 apud HALARAMBOS, 2009).

Os parâmetros que influenciam significativamente na resistência de um solo estabilizado com cimento são o teor de areia de finos, a mineralogia, empacotamento das partículas – densidade, limite de liquidez, teor de umidade, o a quantidade de cimento adicionado e o tempo de cura (ANAGNOSTOPOULOS; CHATZIANGELOU, 2008 apud HALARAMBOS, 2009).

Segundo Halarambos (2009), a variação na resistência à compressão depende da distribuição granulométrica do solo. Ela diminui com o aumento de finos para todos os teores de cimento. Esse decréscimo de resistência fica mais evidente para os teores de 5% e 7%. Esse comportamento é independente do tempo de cura do cimento. Tal comportamento pode ser observado no gráfico da Figura 4.

Figura 4-Influência do teor de finos (F) na resistência à compressão para diferentes teores de cimento

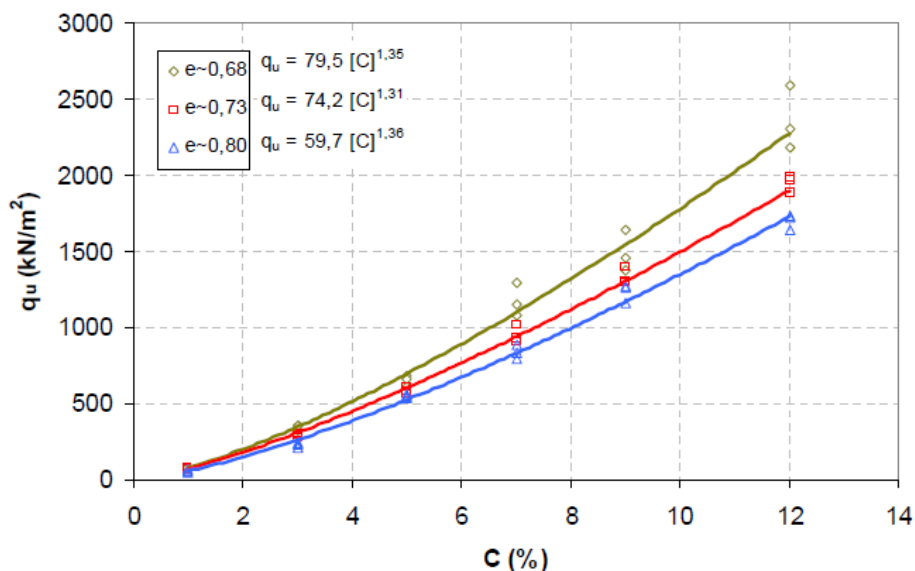


Fonte: Halarambos (2009)

Cruz (2008) verificou que a resistência à compressão simples de uma areia granulometricamente fina, limpa e uniforme sofre um aumento com o incremento da quantidade de cimento, variando conforme o índice de vazios e a porcentagem de cimento. Para teores de cimento maiores, a resistência à compressão simples também é maior. Quanto maior o índice de vazios, menor a resistência.

O gráfico construído por Cruz (2008), representado na Figura 5, mostra a variação da resistência à compressão simples com a variação do teor de cimento.

Figura 5 - Resistência à compressão simples em 3 índices de vazios diferentes



Fonte: Cruz (2008)

Consoli *et al.* (2009) executou ensaios triaxiais drenados em corpos de prova de solo cimentados artificialmente reforçados com fibras discretas de polipropileno. Os corpos de prova cimentados foram preparados com teores de cimento variando de 0-10% com relação ao peso de areia seca. Os testes indicaram que a adição de cimento à areia aumenta a dureza, pico de resistência e fragilidade.

Este autor inclusive desenvolveu uma metodologia de dosagem de misturas solo-cimento que tem sido amplamente aceita pela comunidade científica e citado em mais de 300 trabalhos posteriores, dentre os quais: Correia, Oliveira e Lemos (2019); Miturski, Głuchowski e Sas (2021); Cantor e Ovalle (2021) e Buritatum *et al.* (2022).

A metodologia de dosagem por  $\eta/C_{iv}$ , reportada em Consoli *et al.* (2007), visa estabelecer correlação entre a resistência à compressão simples do solo estabilizado e uma grandeza dada pela razão entre a porosidade da mistura e o teor volumétrico de cimento (Civ). De acordo com o Consoli *et al.* (2009), apesar do largo uso do cimento Portland no melhoramento de solos locais, não havia metodologias de dosagem baseadas em critério racional, como no caso da tecnologia do concreto, onde o fator água/cimento desempenha um papel fundamental na avaliação da resistência alvo.

Para uma mistura de solo cimento, a fórmula da porosidade específica é definida pela Eq. 1:

$$\eta = 100 - 100 \left[ \left( \frac{\left\{ \frac{\gamma d * V_s}{\left[ 1 + \left( \frac{C}{100} \right) \right]} \right\}}{G_{S_s}} \right) + \left( \frac{\left\{ \frac{\gamma d * V_s}{\left[ 1 + \left( \frac{C}{100} \right) \right]} \right\}}{G_{S_c}} \right) \right] / V_s \quad \text{Eq. 1}$$

onde:

$V_s$  = volume do corpo de prova

$\gamma d$  = peso específico seco

$C$  = teor de cimento em peso

$G_{S_s}$  = densidade real dos grãos de solo

$G_{S_c}$  = densidade real dos grãos de cimento

O teor volumétrico de cimento ( $C_{iv}$ ) pode ser calculado a partir da Eq 2:

$$C_{iv} = 100 \left\{ \frac{\left[ \frac{\gamma d * V_s}{1 + C/100} \right] \left( \frac{C}{100} \right)}{G_{S_c}} \right\} \quad \text{Eq 2}$$

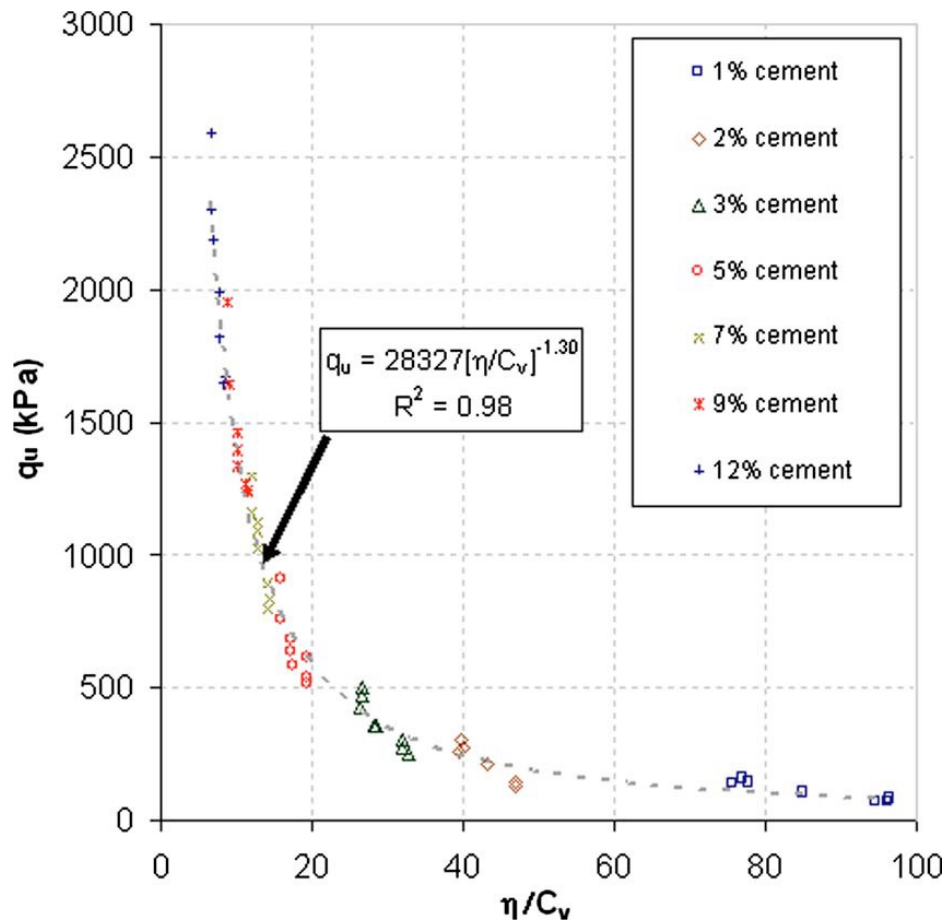
Consoli *et al.* (2010) estudou o comportamento mecânico das misturas da Areia de Osório-Cimento, realizando ensaios de resistência à compressão simples ( $\sigma_c$ ) com teores de cimento variaram de 1% a 12% e a porosidade da mistura de 38% a 45%.

As areias de Osório usadas nos ensaios foram classificadas como areia fina uniforme não-plástica com partículas arredondadas. A análise mineralógica mostrou que as partículas de areia eram predominantemente quartzo. O índice de vazios máximo e mínimo são de 0,9 e 0,6 respectivamente. Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial como agente cimentante.

A Figura 6 mostra os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples reportados por Consoli *et al.* (2010). A Eq 3 representa o ajuste matemático proposto pelos autores. O coeficiente de determinação  $R^2$  para o modelo é da ordem de 0,98, que indica uma excelente correlação.

$$q_u = 28327(\eta/C_{iv})^{-1,3} \quad \text{Eq 3}$$

Figura 6 – Variação da Resistência à Compressão Simples da areia de Osório com a razão porosidade/cimento.



Fonte: Consoli et al (2010)

Quanto à resistência mínima que deve ser obtida em uma mistura solo-cimento considerando seu uso em aplicações relacionadas a rodovias, tanto a norma ABNT NBR 12253 – Solo-cimento – para emprego como camada de pavimento, quanto a NORMA DNIT 143/2010 – ES - Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de serviço, determinam que se deva adotar o teor de cimento que com o qual se obtenha a resistência mínima de 2,1 MPa aos 7 dias de cura, no ensaio de resistência à compressão simples, sendo vetada a extrapolação das curvas de dosagem.

Quanto à questão ambiental, o uso do cimento como estabilizante químico de solo não constitui um problema segundo Fernandes (2019). Este autor afirma que o cimento quando misturado como o solo úmido não traz nenhum prejuízo à natureza nem à saúde porque uma vez hidratado, comporta-se como um mineral.

## 2.3 APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS DAS ADF

Diversos estudos sobre a aplicação das ADF em obras de infraestrutura podem ser encontrados na literatura nacional e internacional, alguns dos quais são reportados nesta seção.

Klinsky e Fabbri (2008) avaliaram 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 volume diário médio (VDM) inferior a 1500 veículos e com  $N \leq 5 \times 10^6$  solicitações de eixo padrão de 80 kN.

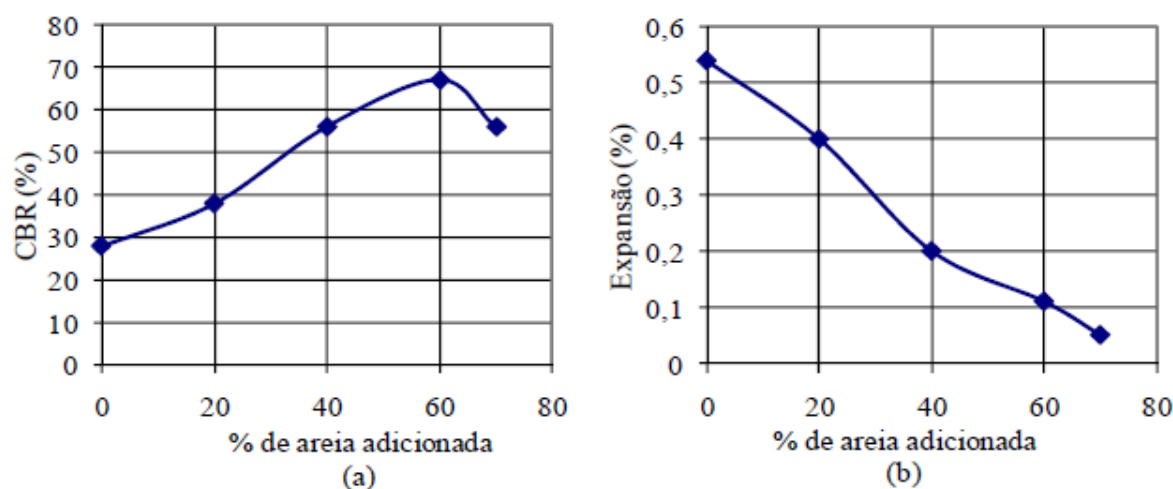
A técnica utilizada no estudo de Klinsky e Fabbri (2008) foi a de estabilização granulométrica; para isso, o solo foi misturado com areia de fundição (AF) em diferentes teores, em peso (0%, 20%, 40%, 60%, 70%)

Os ensaios de CBR e expansão foram executados na energia intermediária em misturas solo-areia. A Figura 7a mostra os resultados desses ensaios. Nela nota-se um aumento do índice de suporte Califórnia, a partir do solo natural, em função do aumento do teor de areia adicionada, até a quantidade de 60% de ADF, apresentando CBR de 28% para a mistura sem ADF e atingindo 67% para misturas com 60% de; a partir deste teor de areia o valor do CBR decresce.

A Figura 7b apresenta os valores de expansão obtidos a partir do ensaio de CBR. Nela verifica-se que as expansões são baixas, menores que 0,5%, para todos os teores de areia de fundição adicionado; também se nota uma tendência decrescente da expansão com o incremento da porcentagem de areia.



Figura 7 - Variação dos valores de CBR e expansão com o teor de areia de fundição adicionado à matriz Jardim Botânico



Fonte: Klinsky e Fabbri (2008)

Santos (2015) estudou a estabilização volumétrica de um solo residual de gnaiss com comportamento expansivo, compactado, que ocorre na cidade de Joinville - SC, através da incorporação de ADF. O autor chegou à conclusão de que o acréscimo de ADF reduz a umidade ótima da mistura, uma vez que o solo residual de gnaiss, por se tratar de um solo silto-arenoso, necessita de mais água para lubrificar as partículas.

Semelhantemente fez Reus (2021), que investigou a viabilidade da ADF como material para execução de camadas de pavimentação. Investigou o comportamento geotécnico da areia de fundição pura e misturada a um solo residual, verificou trâmites e documentos necessários, junto aos órgãos responsáveis, para homologar a utilização da ADF e realizou comparação de custos em relação a uma obra de pavimentação já executada.

A autora concluiu que:

A capacidade de carga da ADF é fortemente influenciada pela energia de compactação, onde os maiores valores de CBR foram obtidos na energia modificada. Ainda, foi verificado que a ADF pura apresentou um melhor desempenho sob energia intermediária e modificada comparado às outras misturas. Outra vantagem da utilização da ADF pura refere-se à expansão, onde os percentuais obtidos foram irrisórios. Além disso, com os ensaios foi possível concluir que a ADF pura atende aos parâmetros para ser utilizada como material de reforço de subleito e sub-base de pavimentos (REUS, 2021, p.110).

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) estabelece valores de expansão máximos e valores de CBR mínimo para solos empregados em obras de pavimentação e infraestrutura viária, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2- Expansão máxima admitida pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006)

<b>Camada do Pavimento</b>	<b>Expansão Máxima</b>	<b>CBR</b>
<b>Subleito</b>	$\leq 2\%$	$\geq 2\%$
<b>Reforço do Subleito</b>	$\leq 1\% *$	Maior que o subleito
<b>Sub-base</b>	$\leq 1\% *$	$\geq 20\%$
<b>Base</b>	$\leq 0,5\%*$	$\geq 80\%$

\* Medida com sobrecarga de 10lb

Fonte: Autor (2022)

Nesse contexto, tanto as misturas de solo-ADF estudada por Klinsky e Fabbri (2008), quanto por Reus (2021), possuem expansibilidade adequada a todas as camadas de pavimentação, ou seja, inferiores à 0,5.

Fox e Mast (1998), integrantes do Programa Conjunto de Pesquisa em Transporte, do Departamento de Transportes de Indiana, nos EUA, publicaram um estudo (realizado na Purdue University) sobre o desempenho geotécnico de aterros de uma rodovia construída usando-se ADF. Segundo este estudo, os resultados indicam que as ADF podem ser usadas de maneira exitosa como material de preenchimento de aterro para projetos de rodovia em escala real.

Gedik *et al.* (2008) testaram ADF estabilizada com cimento e cal, estes na proporção de em 2%, 4%, 8% e 10% em peso. As amostras estabilizadas foram posteriormente curadas por 7 dias, 14 dias e 28 dias para observar o efeito da estabilização pelo teste de velocidade de pulso ultrassônico (UT), teste de resistência à compressão simples (RCS) e (CBR). Ambos, cimento e a cal promoveram ganho de resistência na ADF, sendo que o cimento se mostrou um agente de cimentação significativamente melhor.

Yaghoubi *et al.* (2020) estudou as propriedades de resistência ao cisalhamento e comportamento tensão-deformação de resíduos de areia de fundição e as comparou com resíduo de vidro reciclado do tamanho de areia (RVR), que é um material de construção aceito para

projetos de construção geotécnica e pavimentação. Os resultados indicaram que, embora as propriedades de resistência da ADF fossem inferiores às do RVR, a ADF poderia atender às características necessárias para ser usado em aplicações como aterros de engenharia e aterros rodoviários.

Uma vez que se pretende empregar as ADF em obras rodoviárias, é necessário que seja feita uma análise química a fim de identificar possíveis elementos acima dos níveis do permitido para que considerado perigoso ou não inerte. Penkaitis e Sígolo (2012) afirmam que a disposição de resíduos no solo pode causar contaminação direta do solo devido à presença de metais e também pode contaminar as águas subterrâneas e o ambiente superficial circundante.

Segundo a Lei 17.479/18 do Estado de Santa Catarina poderão ser utilizadas para fins dados pela própria lei a areia proveniente do processo produtivo da fabricação de peças fundidas, como areias de macharia, de moldagem, “areia a verde”, preta, empoeiramento, de varrição, entre outras areias que sejam classificadas conforme a ABNT NBR 10004 como classe II – não perigoso, livre de mistura como qualquer outro resíduo ou material estranho ao processo que altere suas características.

Heidemann *et al.* (2021) relata que as concentrações medidas nos testes de lixiviação são menores que os valores limites reportados na norma ABNT NBR 10004 para todos os compostos avaliados. Por outro lado, os testes de solubilização revelaram concentrações de Al, Fe, fenóis, Pb, Ba, Cr e Mn superiores do que os valores-limite padronizados. Em vista disso, o ADF não pode ser classificado como um material inerte. No entanto, ainda que mais alto do que os valores limites, tais concentrações permitem classificar esta ADF como um material não perigoso, não inerte.

A mistura de cimento com a areia de fundição é considerada interessante não apenas no âmbito mecânico, mas também no âmbito ambiental.

O cimento pode tornar a areia de fundição não perigosa por vários mecanismos, tanto físicos quanto químicos. Primeiro, o cimento reveste as partículas de areia, impedindo fisicamente que soluções entrem em contato e lixivem as areias que contêm chumbo. Em segundo lugar, o cimento é alcalino. No pH alcalino do cimento, formam-se compostos de chumbo insolúveis (por exemplo, silicatos de chumbo). O cimento também neutraliza os ácidos que podem lixiviar o chumbo (ZIRSCHKY; PIZNAR, 1988, p.715)

Guney *et al.* (2006) apud Gedik *et al.* (2017) avaliou o comportamento ambiental de areias descartadas de fundição misturadas com cal e cimento. Os autores afirmam que a água passante pelas ADFs ou pelas misturas à base de ADF não se tornaram contaminadas com

componentes metálicos, já que as concentrações medidas foram aparentemente inferiores aos limites da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA). Em outras palavras, se utilizado e se houver contato entre a ADF e água que houver sido despejada diretamente no ambiente (e.g. drenagem através de pavimento asfáltico), a qualidade da água não será afetada por nenhum metal lixiviado da ADF ou de misturas à base de ADF (GEDIK *et al.*, 2017).

Bioensaios foram conduzidos com amostras de ADF oriundas de 13 fundições americanas e as comparou com areias virgens. A maioria das ADF tiveram pouca ou nenhuma toxicidade adversa, e em algumas amostras, apresentaram toxicidade menor que as areias virgens. As ADF que apresentaram toxicidade superior às areias virgens foram diretamente relacionadas com as resinas orgânicas presentes nas amostras quimicamente ligadas. (BASTIAN; ALLEMAN, 1998 apud ALVES, 2012)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho estudou a resistência a compressão simples de uma areia descartada de fundição (ADF), misturada com cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), em 5 diferentes proporções em peso de sólidos e em 3 diferentes tempos de cura: procedimento este realizado em cinco etapas: dosagem, moldagem, controle dimensional e de peso, cura e ruptura dos corpos de prova. Este capítulo detalha os materiais utilizados e cada uma das etapas experimentais.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 ADF

A ADF usada neste estudo foi a mesma descrita por Heidemann et al. (2021). Os principais componentes químicos da ADF podem ser vistos na Tabela 1, que evidencia a alta concentração de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Tabela 1 - Composição Química da ADF

Componente	Concentração (% em massa)
$\text{SiO}_2$	91
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1
$\text{MgO}$	0,4
$\text{Na}_2\text{O}$	0,3
$\text{K}_2\text{O}$	0,3
$\text{TiO}_2$	0,2
$\text{CaO}$	0,2
Perda ao fogo	3,4

Fonte: adaptado de Heidemann et al (2021)

A Figura 8 mostra o aspecto da ADF usada neste estudo. Este material tem coloração escura, textura arenosa, com presença alguns grumos esbranquiçados. Também vale destacar que há presença de 12% de finos. Estas e outras características físicas e geotécnicas da ADF podem ser verificadas na Tabela 2 e na curva granulométrica mostrada na Figura 9, de onde constata-se que se trata de uma areia majoritariamente fina.

Figura 8 - ADF usada neste estudo



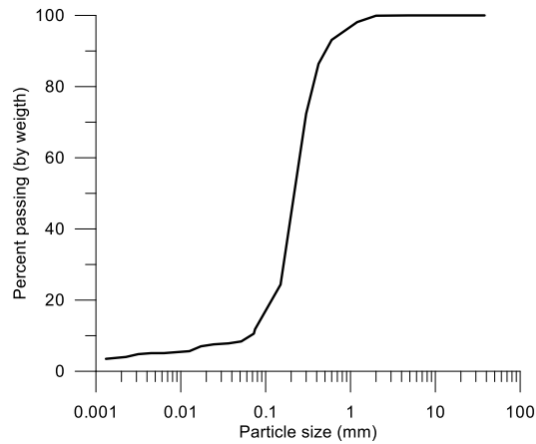
Fonte: Autor (2022).

Tabela 2- Propriedades Geotécnicas Básicas da ADF.

Material	WFS
Densidade Real dos Grãos (G)	2.61
Índice de Plasticidade	Não plástica
% de finos	12
Classificação Unificada (USCS)	SP
Classificação Rodoviária (HRB)	A-2-4
d10 (mm) <sup>3</sup>	0.07
d30 (mm) <sup>3</sup>	0.17
d60 (mm) <sup>3</sup>	0.25
Coefficiente de uniformidade (CU)	3.57
Coefficiente de curvatura (CC)	1.65
Índice de vazios máximo (emax)	0.85
Índice de vazios mínimo (emin)	0.56

Fonte: Heidemann et al (2021)

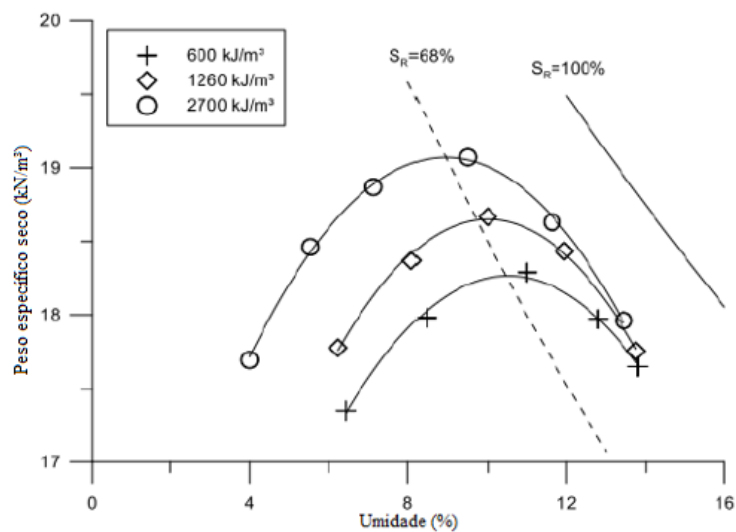
Figura 9 - Curva Granulométrica da ADF utilizada



Fonte: Heidemann et al (2021)

A Figura 10 mostra as curvas de compactação desta ADF pura, obtidas por Heidemann *et al.* (2021). As energias de 600 kJ/m<sup>3</sup>, 1260 kJ/m<sup>3</sup> e 2700 kJ/m<sup>3</sup> correspondem às energias normal, intermediária e modificada de compactação, respectivamente, segundo a norma NBR 7182/2016 (Compactação dos solos). Na curva referente à energia normal de compactação observa-se que o teor de umidade ótimo é da ordem de 11,5%, saturação de 68% e o peso específico seco máximo atinge 18,2 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 10 - Curvas de Compactação da ADF

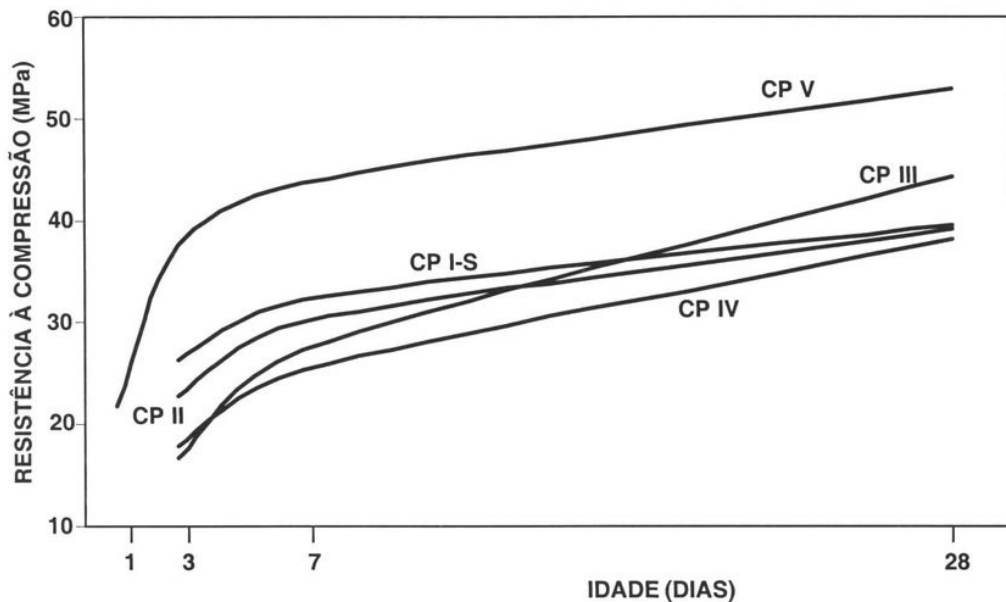


Fonte: adaptado de Heidemann et al (2021)

### 3.1.2 Cimento

O cimento usado nos ensaios foi o CP-V ARI da marca Itambé. Segundo a fabricante, o CP-V ARI tem alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem a que é submetido, proporcionando maior rendimento ao concreto. É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada. A escolha deste tipo de cimento se deve ao fato de ser o que gera ganho de resistência mais rapidamente, como se observa na Figura 11.

Figura 11 - Evolução de resistência à compressão dos tipos de cimento Portland.



Fonte: ABCP (2002)

A escolha deste tipo de cimento, o CPV ARI, não é em vão, não somente pelo rápido ganho de resistência, algo imprescindível para obras que demandam agilidade na execução, como também uma maior resistência final.

O Quadro 3 traz um resumo das especificações presentes na norma brasileira ABNT NBR 5733 que o cimento CP-V ARI deve cumprir.



Quadro 3- Resumo das especificações da ABNT

Parâmetros	CP V-ARI
Tempo de início de Pega (h)	$\geq 1$
MgO (%)	$\leq 6,5$
Perda ao Fogo (%)	$\leq 6,5$
Resíduo Insolúvel (%)	$\leq 3,5$
SO <sub>3</sub> (%)	$\leq 4,5$
Adições Permitidas (%)	
Escória	0
Fíler calcário	0 a 10
Material Pozolânico	0

Fonte: Cimentos Itambé (2022)

Apesar de a norma indicar que o tempo de início de pega deve ser superior a 1 hora, os estudos realizados pela Itambé cimentos no ano de 2021 resultaram em tempo de início de pega sempre igual ou superior a 150 minutos. A densidade real dos grãos do cimento CP V-ARI é de 3,09g/cm<sup>3</sup> (CIMENTOS ITAMBÉ, 2021).

### 3.2 METODOLOGIA

Esta seção detalha as atividades executadas na campanha experimento e está dividida em cinco partes, dosagem das misturas, moldagem, controle dimensional e de peso, cura dos corpos de prova e o ensaio de Resistência à Compressão Simples, que leva à ruptura dos corpos de prova.

Foram moldados 9 corpos de prova para cada um dos teores de cimento que foram propostos, sendo 3 corpos de prova para cada tempo de cura. Os teores de cimento em peso propostos neste trabalho foram de 3%, 6%, 9%, 12% e 15%. A escolha por um espectro de teores de cimento de até 15% se deve ao fato que se buscou atingir a resistência de 2,1 MPa sugerido pela para solo-cimento, bem como apresentar uma faixa de teores tal que reduzisse a necessidade de extrapolações, considerando os teores em geral viáveis para a maior parte das aplicações de ADF. Os tempos de cura de 7 dias, 14 dias e 28 dias foram adotados como forma de avaliar o desempenho da estabilização ao longo do tempo. Ao todo foram ensaiados 45 corpos de prova.

A umidade usada na confecção dos corpos de prova foi de 11,5%, que é o valor da umidade ótima para a energia normal de compactação da ADF pura, descrito na seção 3.1.1 ADF.3.1.1 ADF

### 3.2.1 Dosagem

A dosagem de materiais para a confecção dos corpos de prova foi feita com auxílio de uma planilha eletrônica (que pode ser encontrada no Apêndice A) formada a partir de equações que serão demonstradas a seguir. A partir da densidade seca máxima e da umidade ótima obtida por meio de ensaio Proctor (vide Figura 10 na seção 3.1.1 ADF) e do volume do corpo de prova, tem-se o peso do corpo de prova, conforme a Eq 4:

$$Wt(g) = \gamma d * Vt * \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad \text{Eq 4}$$

onde:

$Wt$  = Peso total do corpo de prova

$\gamma d$  = densidade seca

$w$  = umidade.

O peso de sólidos (i.e ADF + cimento) é:

$$Ws(g) = \gamma d * Vt \quad \text{Eq 5}$$

O peso de ADF é:

$$Ws(solo) = \frac{Ws(g)}{1 + \left(\frac{C}{100}\right)} \quad \text{Eq 6}$$

onde:

$C$  = teor de cimento

O peso de cimento foi substituído em função do peso total de sólidos, conforme Eq 7:

$$W_s(\text{cimento}) = \frac{C}{100} * W_s(\text{solo}) \quad \text{Eq 7}$$

O peso de água é:

$$W_w = \frac{w}{100} * (W_s(\text{solo}) + W_s(\text{cimento})) \quad \text{Eq 8}$$

Para cada corpo de prova a ser confeccionado, somou-se o peso da areia de fundição e do cimento e da água foram incorporados à mistura, conforme a equação Eq 9:

$$W_s(\text{solo}) * FS + W_s(\text{Cimento}) * FS + W_w * FS \quad \text{Eq 9}$$

onde:

FS = fator de sobra para compensar as perdas que ocorrem durante o ensaio. Pode ser escolhido de acordo com a experiência prática do ensaísta, variando de 1,1 a 1,15.

A água foi pesada em um béquer de vidro e despejada de forma uniforme na amostra de ADF, inicialmente sob umidade higroscópica e revolvida para que atingisse uma mistura homogênea. Após preparada essa mistura, foi coletada uma amostra para controle de umidade (Figura 12) e a areia foi colocada em sacos plásticos fechados (para que a umidade definida fosse mantida e homogeneizada em toda a amostra).

Figura 12- ADF úmida sendo pesada



Fonte: Autor (2022)

Confirmada, via estufa, a umidade da areia umidificada previamente, pesou-se a ADF e fez-se o devido ajuste de umidade para o intervalo de confiança de 95% e adicionou-se o cimento. A Figura 13 mostra um recipiente plástico no qual a ADF úmida foi misturada com cimento Portland CPV ARI

Figura 13 - ADF misturada com cimento



Fonte: Autor (2022)

### 3.2.2 Moldagem

Após a dosagem e mistura dos materiais, foi feito a separação de solo em cápsulas de porcelana (Figura 14) devidamente taradas, pois o corpo de prova foi compactado em três camadas, cujo peso foi calculado pela equação Eq 10.

Esta soma  $Wt$  (g) corresponde ao peso de um corpo de prova confeccionado

$$W \text{ Camada} = \frac{Wt(g)}{3} \quad \text{Eq 10}$$

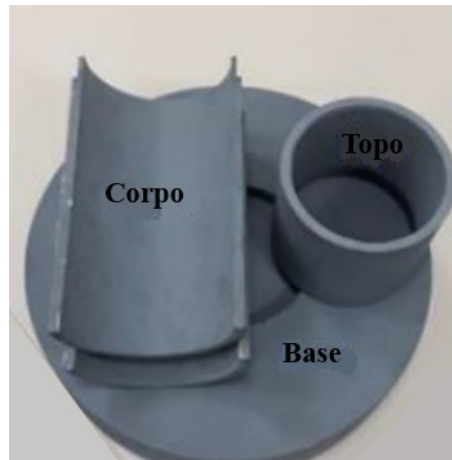
Figura 14- Areia pesada para compactação da respectiva camada



Fonte: Autor (2022)

A areia de cada camada foi despejada dentro de um molde bipartido (Figura 15). Este molde é composto por quatro partes, base, corpo (2 peças) e topo. A base, tem por objetivo fixar o corpo durante a moldagem. O corpo do molde, foi dividido em duas partes iguais para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova e possui dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O topo permite garantir o encaixe entres as duas partes do corpo durante a moldagem dos corpos de prova e o acondicionamento do volume total de solo a ser utilizado.

Figura 15-Molde Bipartido



Fonte: Reus (2020)

Um tarugo de nylon (Figura 16) foi colocado na parte superior, do molde para compactação da camada. Este tarugo serve tanto para compactar a camada de solo, quanto para o controle de altura da mesma, que deve ser de 33,33 mm, uma vez que a altura do corpo de prova é 100 mm.

Figura 16 - Tarugo de Nylon



Fonte: Autor (2022)

Os corpos de prova foram compactados estaticamente em uma prensa hidráulica manual (Figura 17), dentro do molde devidamente lubrificado com vaselina, para que pudesse ser desmoldado posteriormente, sem danos, e a compactação ocorrer de forma uniforme. O topo

da primeira e da segunda camada foram escarificados para garantir adequado contato entre as mesmas. Um óleo mineral similar ao SAE60 foi aplicado às faces do cilindro para facilitar a remoção do corpo de prova.

Após a moldagem, o corpo de prova foi imediatamente extraído do molde. Seu peso foi medido em uma balança igual a presente na Figura 12, com precisão centesimal, foram realizadas três medições de o seu diâmetro e altura com auxílio de um paquímetro com precisão decimal e registrado o valor médio das dimensões.

Figura 17 -Prensa Hidráulica



Fonte: Autor (2022)

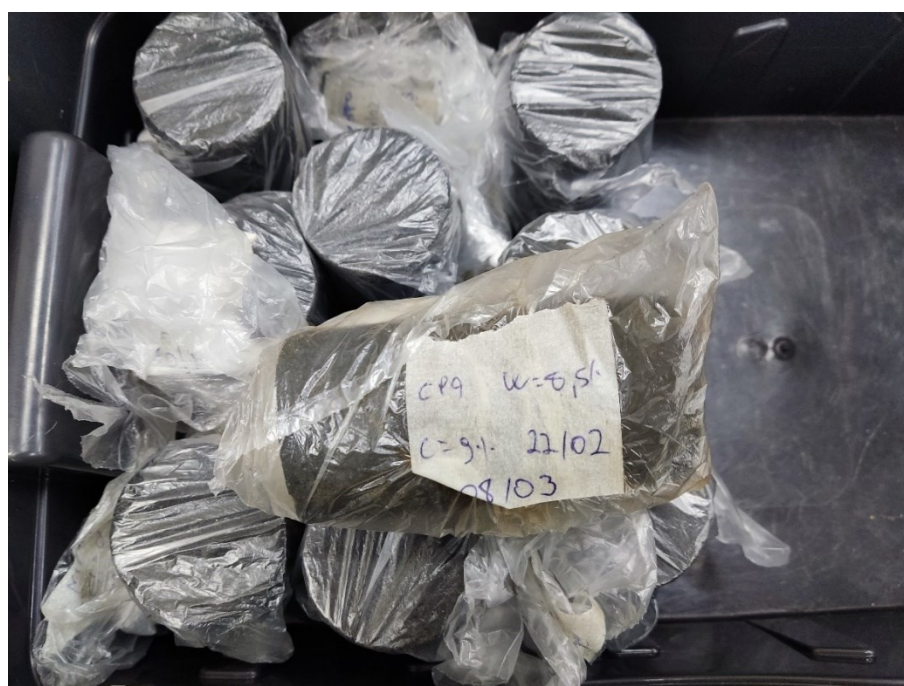
Todas as informações concernentes a peso, altura, diâmetro, volume, densidade natural ( $\gamma_n$ ), densidade seca ( $\gamma_d$ ), índice de vazios ( $e$ ) e porosidade ( $\eta$ ) se encontram no APÊNDICE B – Tabela de Resultados.

A execução do ensaio foi baseada nas diretrizes da norma NBR 12024 (ABNT, 2012), que estabelece a metodologia de moldagem e cura de corpos de prova.

### 3.2.3 Cura

Os corpos de prova foram então acomodados em sacos plásticos fechados (Figura 18) para evitar variações de umidade (ensaios preliminares feitos sem o uso de sacos plásticos para evitar a variação de umidade, chegaram a ter perda de resistência significativas, além de grande imprevisibilidade nos resultados) e devidamente identificados. Posteriormente, os corpos de prova foram armazenados em caixas fechadas, dispostas de forma que perturbações fossem evitadas.

Figura 18 - Corpos de Prova Ensacados para preservação da umidade.



Fonte: Autor (2022)



### 3.2.4 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

De acordo com Consoli *et al.* (2011), o ensaio de resistência à compressão simples tem sido usado na maioria dos programas experimentais reportados na literatura para verificar a efetividade da estabilização com cimento ou obter uma aproximação da importância de fatores de influência na resistência de solos cimentados. Uma das razões para isso é a experiência acumulada com esse tipo de teste para concreto. O teste também é simples, rápido, confiável e barato.

O ensaio de compressão simples pode ser executado de duas maneiras:

- Por deformação controlada: controla-se a velocidade de deformação do corpo de prova e mede-se a carga aplicada correspondente;
- Por carga controlada: controla-se a carga aplicada ao corpo de prova e mede-se a deformação correspondente.

Este trabalho fez uso de uma prensa que atua por deformação controlada.

Após os tempos determinados de cura, os corpos de prova foram submersos em água para minimizar os efeitos da sucção, onde foram mantidos por no mínimo 5 horas anteriores ao ensaio. De forma geral os corpos de prova ensaiados neste trabalho foram mantidos por 24h em imersão. Como a ADF é fina e tem 12% de finos, a extensão do prazo de imersão busca facilitar a entrada de água nas regiões mais internas do corpo de prova, já que não se dispunha de um aparato que permitisse saturação forçada. A Figura 19 mostra os corpos de prova recém retirados da imersão em água para que fossem, nas devidas datas, ou seja, com 7, 14 e 28 dias após a moldagem, rompidos (Figura 20).

Figura 19 - CPs prontos para serem rompidos após ficarem 24 horas submersos em água



Fonte: Autor (2022)

A prensa CBR utilizada era do tipo elétrica (Figura 20). A prensa possui um motor elétrico que eleva por meio de um pistão uma base metálica circular à uma velocidade de 1,27mm/min (padrão CBR).

O corpo de prova foi então colocado sobre a base circular (Figura 20), sobre ele foi colocado um disco metálico e sobre este foi colocado uma esfera, a fim de que toda carga seja distribuída ao corpo de prova uniformemente.

Figura 20 - CP na prensa para ser rompido



Fonte: Autor (2022)

O esforço do corpo de prova carregado sob velocidade constante (ou seja, deslocamento controlado) é transmitido para o anel dinamométrico (Figura 21), que possui constante elástica de 17,8 N/ $\mu$ m. Enquanto o corpo de é comprimido, o relógio comparador mede a deformação do anel dinamométrico. O valor máximo a ser mostrado no relógio comparador se dá no momento do rompimento do corpo de prova, que é o critério de parada do ensaio.

Esse valor é registrado para o cálculo da resistência à compressão simples alcançada, que é obtida pela equação Eq 11.

$$q_u = K * \Delta X / \left( \frac{\pi * D^2}{4} \right) \quad \text{Eq 11}$$

onde:

K = Constante elástica do anel dinamométrico

$\Delta X$  = Deformação máxima do anel dinamométrico

D = Diâmetro do corpo de prova

Figura 21 - Anel dinamométrico



Fonte: Solotest (2022)

## 4. RESULTADOS

Por meio dos ensaios apresentados na metodologia, obtiveram-se dados para avaliar o desempenho das misturas ADF-cimento quanto à resistência à compressão simples para uso em obras de infraestrutura e mais especificamente nas camadas estruturais de um pavimento. Foram analisados os ganhos de resistência em função do incremento no teor de cimento e variação da razão  $\eta/C_{iv}$ . Para cada condição teor de cimento e tempo de cura foram ensaiados 3 corpos de prova, e os resultados mostrados a seguir referem-se à média dos 3 corpos de prova representativos de cada situação.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CORPOS DE PROVA

A Tabela 3 traz os índices físicos médios dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa. Embora sejam muito homogêneos, algumas pequenas diferenças em termos de densidade podem ser observadas entre os corpos de prova ensaiados. Estas diferenças são demonstradas pelas médias e desvios padrão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Índices físicos médios dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa

Tempo de cura	C (%)	$\gamma_n$ (gf/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	e	$\eta$
7 dias	3	1,954	1,752	0,492	33,176
	6	1,973	1,769	0,475	32,802
	9	1,963	1,761	0,482	36,545
	12	1,964	1,761	0,619	38,223
	15	1,965	1,763	0,481	39,783
14 dias	3	1,960	1,758	0,496	32,958
	6	1,960	1,758	0,525	34,862
	9	1,957	1,755	0,576	36,746
	12	1,975	1,771	0,619	37,883
	15	1,981	1,777	0,661	39,298
28 dias	3	1,955	1,753	0,496	33,139
	6	1,958	1,756	0,537	34,920
	9	1,955	1,753	0,582	36,802
	12	1,976	1,773	0,608	37,827
	15	1,984	1,779	0,645	39,212

Fonte: Autor (2022)

Tabela 4 - Estatísticas descritivas para as misturas utilizadas na pesquisa

	$\gamma_n$ (gf/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	e	$\eta$
Média	1,966	1,763	0,553	36,278
Desvio Padrão	0,010	0,009	0,066	2,475

Fonte: Autor (2022)

Quanto às densidades natural e seca, elas tendem a aumentar com o aumento do teor de cimento, porém essa relação não é unívoca e o aumento entre os valores médios para areia moldadas com C=15% foi de apenas cerca 1,01% maior que as médias para areia moldadas com C=3%.

Quanto ao índice de vazios e à porosidade, o teor de cimento influencia diretamente. Isso se deve ao fato que o cimento empregado neste estudo possui densidade real dos grãos (G) igual a 3,09g/cm<sup>3</sup>, enquanto a ADF possui densidade real dos grãos (G) igual a 2,61g/cm<sup>3</sup> e ao se confeccionar os corpos de prova, a massa total em peso se mantém inalterada para quaisquer teores de cimento, assim como o volume interno do molde. Sendo assim, o volume de sólidos diminui à medida que o teor de cimento aumenta, ao passo que o volume de vazios aumenta, ou seja, aumenta a porosidade e o índice de vazios.

## 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES X TEOR DE CIMENTO

A Tabela 5 traz os valores médios de resistência obtidos para cada teor de cimento e tempo de cura ensaiados. Os valores completos (dos três corpos de prova de cada ponto), assim como informações como dimensões precisas, densidade seca, índice de vazios e porosidade se encontram no Apêndice B.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples [kPa]

Teor de Cimento (%)	RCS (kPa)		
	Tempo		
	7 dias	14 dias	28 dias
3	466	494	602
6	969	1012	1101
9	1145	1428	1547
12	1594	2333	2657
15	1933	2717	3134

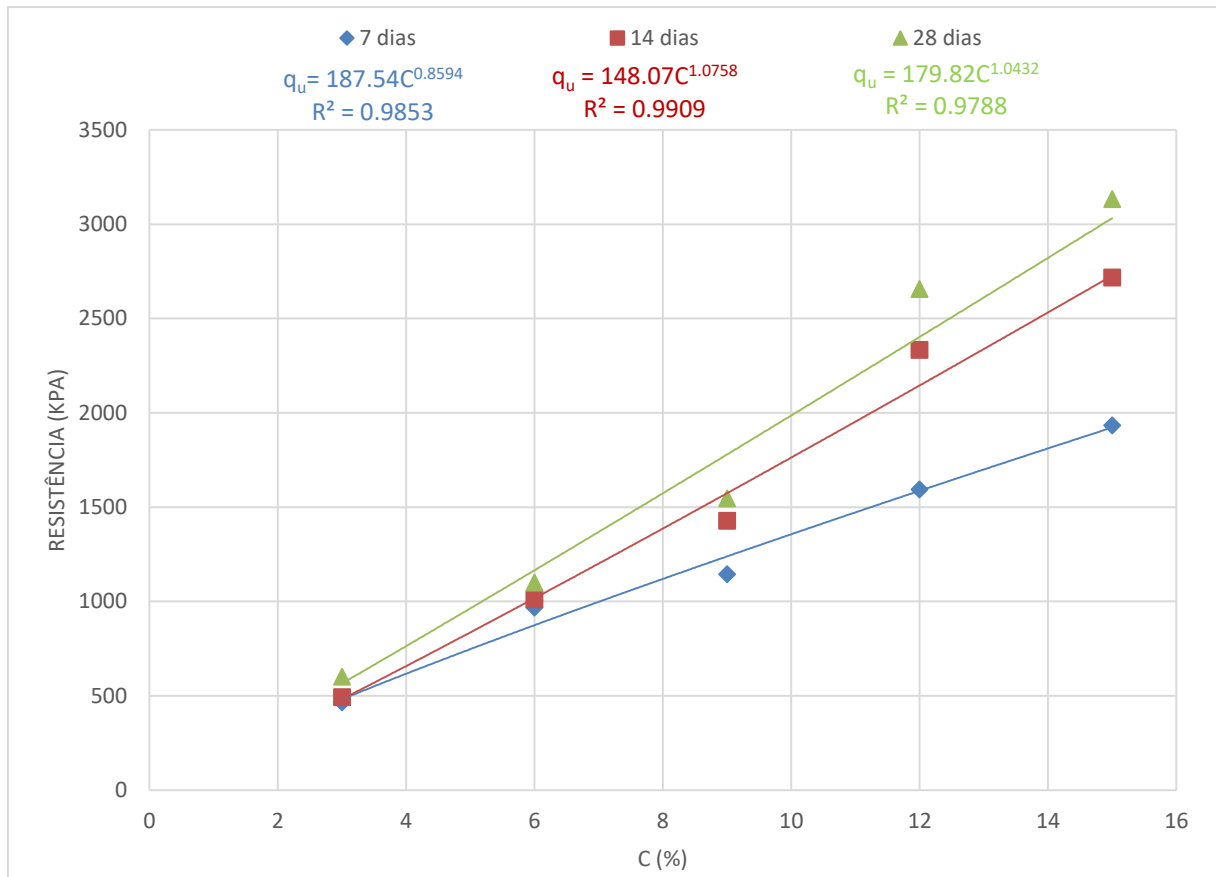
Autor (2022)

A Tabela 5 mostrou um comportamento esperado, de aumento de resistência com o incremento nos teores de cimento e aumento no tempo de cura. Conforme já reportado por Anagstopoulos e Chatziangelou (2008) apud Halarambos (2009), o teor de cimento e tempo de cura influenciam significativamente a resistência do solo, sendo que quanto maior o teor de cimento, tempo de cura e maior a resistência obtida.

No gráfico apresentado na Figura 22 são mostrados os pontos obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples e suas respectivas linhas de tendência geradas a partir de ajuste matemático.

A tendência de crescimento é modelada em uma função do tipo potência, embora uma equação linear também tenha razoável ajuste aos dados medidos, uma vez que os expoentes são próximos a 1. O crescimento da resistência ocorre de forma mais expressiva para tempos de cura maiores, no entanto há pouca diferença na taxa de crescimento da resistência para tempos de cura de 14 e 28 dias, pois os expoentes são superiores a 1, enquanto para tempo de cura de 7 dias, inferior a 1.

Figura 22 - RCS x Teor de Cimento



Fonte: Autor (2022)

A Tabela 6 traz as equações obtidas pelo ajuste matemático, que representam as linhas de tendência de comportamento da resistência obtida por cada dosagem de mistura ADF-Cimento, e que estão presentes no gráfico da Figura 22.

Tabela 6 - Resistência à Compressão Simples x Quantidade de Cimento [kPa] (Equações)

Tempo	Equação	R <sup>2</sup>
7 dias	$q_u = 187,54C^{0.8594}$	R <sup>2</sup> = 0,9853
14 dias	$q_u = 148,07C^{1.0758}$	R <sup>2</sup> = 0,9909
28 dias	$q_u = 179,82C^{1.0432}$	R <sup>2</sup> = 0,9788

Fonte: Autor (2022)

Os resultados foram excelentes no ponto de vista de previsibilidade, uma vez que o menor R<sup>2</sup> foi de 0,9853 aos 7 dias.

Fez-se comparação com os resultados obtidos por Cruz (2008), que ensaiou uma areia mais densa ( $e=0,68$ ) e com menor teor de finos ( $<2\%$ ). A areia estudada neste trabalho tem  $e\sim 0,48$ . A Eq 12 indica o comportamento da mistura solo-cimento proposta por Cruz (2008), enquanto a equação que indica o comportamento da areia usada neste trabalho é encontrada na Tabela 6, referente aos 7 dias de cura.

$$q_u = 79,5 C^{1,3} \quad \text{Eq 12}$$

Na Tabela 7 tem se os valores de RCS de ambas as areias calculados a partir de suas respectivas equações e o gráfico da Figura 23 exhibe o comportamento das mesmas.

Tabela 7 - Comparativo entre Cruz (2008) e Autor (2022)

Teor de Cimento (%)	RCS [kPa]	
	Cruz (2008)	Autor (2022)
3	350	482
4	517	617
5	698	748
6	893	875
7	1100	999
8	1317	1120
9	1544	1239
10	1780	1357
11	2024	1473
12	2276	1587

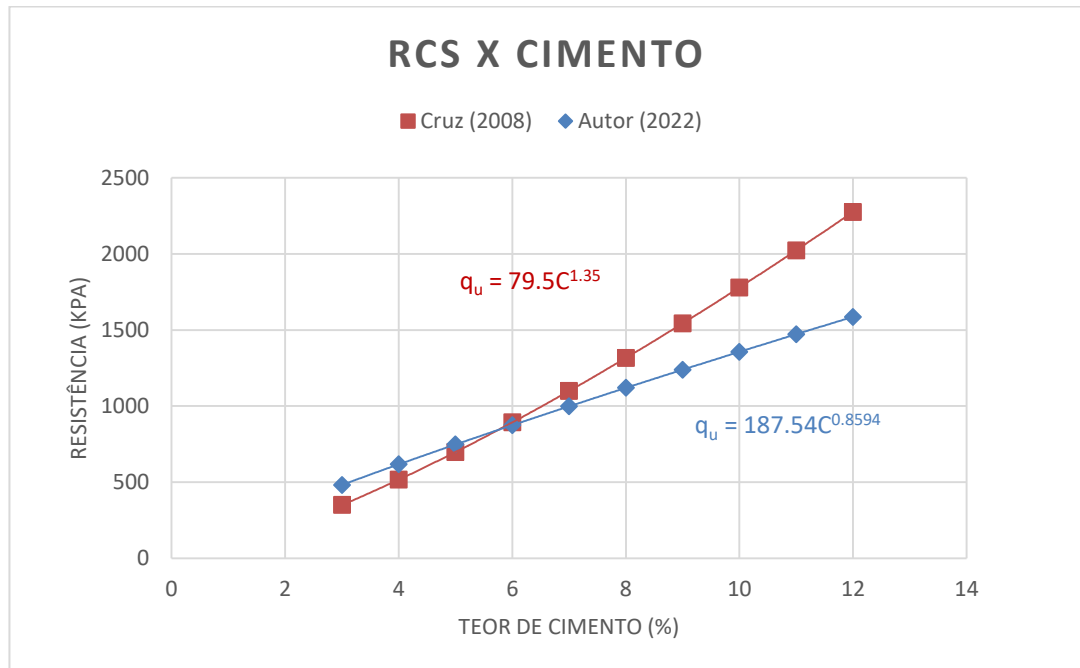
Fonte: Autor (2022)

Como pode-se observar, a mistura estudada por Cruz (2008) possui uma tendência de aumento de resistência mais exponencial, devido ao expoente da sua equação ser maior: 1,35, enquanto a areia estudada neste trabalho possui um escalar maior, que indica resistência maiores quando o teor de cimento é mais baixo e possui uma tendência de aumento de resistência próxima à linear, com expoente igual a 1,0432. Os resultados de RCS da mistura solo-cimento contendo ADF foram mais baixos que o da mistura contendo areia de Osório estudada por Cruz



(2008) para os teores de 3 a 5%, semelhante para teores de 5 a 6% e inferiores para valores acima de 6%.

Figura 23- Comparativo entre os resultados obtidos por Cruz (2007) e Autor (2022)



Fonte: Autor (2022)

#### 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES X $\eta/C_{IV}$

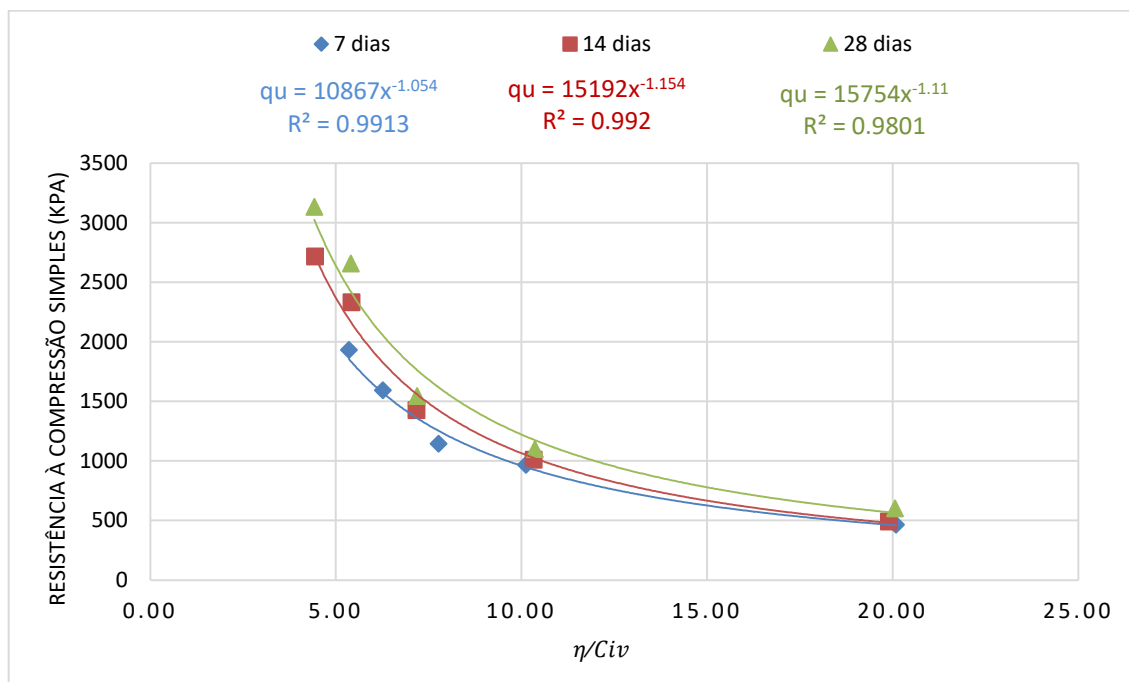
A Tabela 8 traz os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples e os compara com a razão  $\eta/C_{IV}$  das misturas. Esse tipo de análise proposto por Consoli *et al.* (2007) tem por premissa estabelecer metodologias de dosagem baseadas em critério racional.

Tabela 8- Resistência à Compressão Simples x  $\eta/C_{iv}$ [kPa]

7 dias		14 dias		28 dias	
$\eta/C_{iv}$	RCS (kPa)	$\eta/C_{iv}$	RCS (kPa)	$\eta/C_{iv}$	RCS (kPa)
20.09	466	19.89	494	20.06	602
10.12	969	10.33	1012	10.36	1101
7.77	1145	7.17	1428	7.19	1547
6.26	1594	5.42	2333	5.40	2657
5.35	1933	4.44	2717	4.42	3134

Fonte: Autor (2022)

O gráfico da Figura 24 mostra as linhas de tendência obtidas por ajuste matemático dos pontos presentes na Tabela 8.

Figura 24 - RCS x  $\eta/C_{iv}$ 

Fonte: Autor (2022)

Os resultados foram excelentes no ponto de vista de previsibilidade, uma vez que o menor  $R^2$  foi de 0,9801 aos 7 dias. Em comparação com a média de  $R^2$  obtido nas equações RCS x C, a análise RCS x  $\eta/C_{iv}$  leva uma pequena vantagem, pois a média aritmética desta é 0,9978 enquanto daquela 0,9950. As equações obtidas por ajuste matemático se encontram na Tabela 9.

O comportamento decrescente dos gráficos indica que a resistência a compressão simples da mistura é inversamente proporcional à razão  $\eta/C_{iv}$  e o caráter curvilíneo devido ao fato de o ajuste ser uma potência.

Tabela 9- Resistência à Compressão Simples x  $\eta/C_{iv}$  [kPa] (Equações)

Tempo	Equação	R <sup>2</sup>
7 dias	$q_u = 10867 \eta/C_{iv}^{-1.054}$	R <sup>2</sup> = 0.9913
14 dias	$q_u = 15192 \eta/C_{iv}^{-1.154}$	R <sup>2</sup> = 0.992
28 dias	$q_u = 15754 \eta/C_{iv}^{-1.110}$	R <sup>2</sup> = 0.9801

Fonte: Autor (2022)

A Tabela 10 compara resultados calculados a partir da equação Eq 13 obtida por Consoli et al. (2010) ao estudar a areia de Osório, também estudada por Cruz (2008) e os resultados calculados a partir da equação presente na Tabela 9, referente aos 7 dias de cura. O gráfico da Figura 25 ilustra os resultados mostrados na Tabela 10.

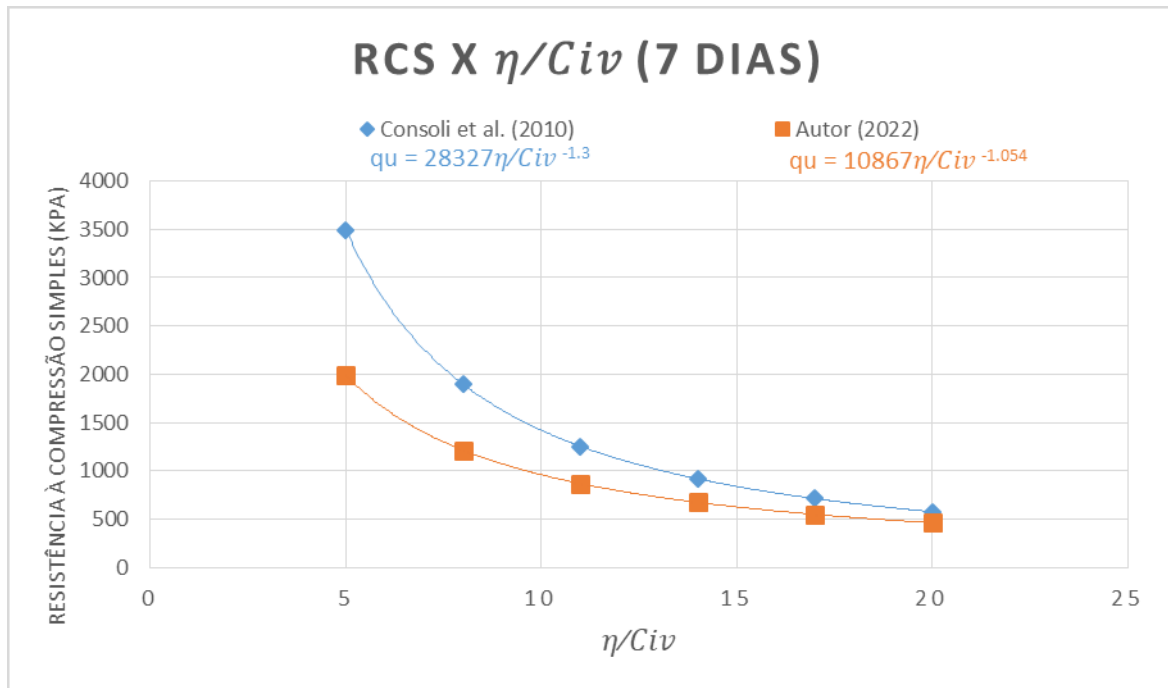
$$q_u = 28327 \times (\eta / C_{iv})^{-1,3} \quad \text{Eq 13}$$

Tabela 10 - Comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho e os de Consoli et al (2010)

$\eta/C_{iv}$	RCS [kPa]	
	Consoli et al (2010)	Autor (2022)
20	577	462
17	712	549
14	917	673
11	1254	868
8	1898	1214
5	3496	1992

Fonte: Autor (2022)

Figura 25 – Comparativo entre Consoli et al (2010) e Autor (2022) para misturas solo-cimento aos 7 dias de cura.



A areia estudada por Consoli et al. (2010) se mostrou melhor em todas as variações de  $\eta/Civ$ , em especial para os valores mais baixos de  $\eta/Civ$ , porém apresentando resultados semelhante para valores altos ( $>17$ ) de  $\eta/Civ$ .

Ambas as linhas de tendência ajustadas possuem uma tendência de aumento de resistência exponencial, inversamente proporcional ao termo  $\eta/Civ$ , devido ao expoente da sua equação ser negativo, sendo que tal característica é mais acentuada para o ajuste matemático obtido por Consoli et al. (2010) pois seu expoente possui módulo maior: -1,3 contra -1,0454 da equação do ajuste das misturas ADF-Cimento.

A proporcionalidade inversa ocorre, pois, quanto maior a razão  $\eta/Civ$ , ou seja, quanto maior for a porosidade e/ou menor o índice de cimento, menor será a RCS da mistura.

## 5. CONCLUSÕES

As areias descartadas de fundição, desde que devidamente avaliadas quanto à toxicidade, podem ser utilizadas como material de construção em obras geotécnicas.

A partir dos resultados apresentados no ensaio de resistência à compressão simples, verifica-se que à medida que se adicionou maiores porcentagens de cimento, as resistências cresceram significativamente, sendo que, para os tempos de cura 14 e 28 dias, o ganho de resistência devido à adição do cimento é tão maior quanto o incremento no teor do mesmo, dado que os expoentes gerados por ajuste matemático de potência são 1,0758 e 1,0432 para 14 e 28 dias, respectivamente. Ou seja, a adição de cimento sem dúvida alguma é benéfica, principalmente para obras em que a questão tempo de cura não é tão crucial, podendo-se esperar 14 ou até mesmo os 28 dias.

Não houve diferença significativa do coeficiente de determinação  $R^2$  para as equações referente à metodologia de dosagem através da variação do parâmetro  $\eta/C_{iv}$  e da metodologia de dosagem através da simples variação do teor de cimento, uma vez que ambas as metodologias de dosagem resultaram em equações com  $R^2$  superiores a 0,97. No entanto essa metodologia apresenta como vantagem a possibilidade de se pode variar tanto o teor de cimento da mistura, quanto a porosidade, a fim de se obter a resistência almejada de forma mais econômica.

Quanto ao uso de ADF-cimento como base de pavimentação, nem mesmo a mistura com 15% de cimento, que resultou em uma resistência média de 1933 kPa (1,933 MPa) atingiu a resistência mínima determinada pela norma DNIT 143/2010, que é de 2,1MPa aos 7 dias, portanto, o seu uso para este fim nas condições estudadas não é possível. Por outro lado, densidades mais elevadas devem satisfazer este requisito e a exploração dessas novas dosagens pode ser tema de futuros trabalhos.

Apesar de não satisfazer as condições determinadas pelo DNIT para aplicação como base de pavimentação, os resultados encontrados e discutidos neste trabalho podem servir como base para quaisquer outras aplicações que possam ser realizadas com misturas ADF-Cimento, principalmente aplicações que possam esperar por tempos de cura superiores a 7 dias.

## REFERÊNCIAS

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

ADEGAS, Roseane Gonçalves. **PERFIL AMBIENTAL DOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO FERROSA QUE UTILIZAM AREIAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**. 2007. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. São Paulo: ABCP, 2002. Disponível em: <https://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/11/28-Guia-basico-de-utilizacao-do-cimento-portland.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ET 35: DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO NORMAS DE DOSAGEM E MÉTODOS DE ENSAIOS**. 3 ed. São Paulo: ABCP, 2004. 63 p. Disponível em: <https://abcp.org.br/dosagem-das-misturas-de-solo-cimento-et-35/>. Acesso em: 18 fev. 2022.

AZEVEDO, Calebe Araújo *et al.* **Melhoramento de Solos com Cimento Portland: uma revisão**. In: GEOCENTRO, 2019. Brasília: Abms, 2019.

BAPTISTA, Cyro de Freitas Nogueira. **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1976.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, setembro de 2017. ISSN:2448-0959

BURITATUM, Apinun; SUDDEEPONG, Apichat; HORPIBULSUK, Suksun; UDOMCHAI, Artit; ARULRAJAH, Arul; MOHAMMADINIA, Alireza; HORPIBULSUK, Jitwadee; HOY, Menglim. **Improvement of Tensile Properties of Cement-Stabilized Soil Using Natural Rubber Latex**. *Journal Of Materials In Civil Engineering*. McLean. 1 abr. 2022.

CANEPPELE, Jeferson William. **ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO RESIDUAL COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**. 2016. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de

Engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1279/1/2016JefersonWilliamCaneppele.pdf>.

Acesso em: 10 set. 2021.

CANTOR, David; OVALLE, Carlos. Packing properties and steady strength of cemented loose granular materials. **Computers And Geotechnics**. Montréal. nov. 2021.

CARNIN, Raquel Luísa Pereira. **Dados sobre a geração de Areias Descartadas de Fundição**. Informação obtida através do e-mail [raqueljoin@gmail](mailto:raqueljoin@gmail.com) em 24 jun. 2021.

CASOTTI, B. P. et al. Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. BNDES Setorial, n. 33, p. 121–162, mar. 2011.

CHEGATTI, Schirlene. **APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO EM MASSA ASFÁLTICA, CERÂMICA VERMELHA E FRITAS CERÂMICAS**. 2004. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87646>. Acesso em: 04 fev. 2022. CLEAN WASHINGTON CENTER. **BENEFICIAL REUSE OF SPENT FOUNDRY SAND**. 1996. Disponível em: <https://p2infohouse.org/ref/05/04013.pdf>. Acesso em: 17 set. 2021.

CORREIA, António Alberto Santos; OLIVEIRA, P.J. Venda; LEMOS, L.J.L.. Strength assessment of chemically stabilised soft soils. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**. Coimbra, p. 218-227. jun. 2019.

CONSOLI, Nilo Cesar; FOPPA, Diego; FESTUGATO, Lucas; HEINECK, Karla Salvagni. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**. Reston, p. 197-205. fev. 2007.

CONSOLI, Nilo César *et al.* Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**. Reston, p. 1347-1353. fev. 2009.

CONSOLI, Nilo Cesar; CRUZ, Rodrigo Caberlon; FLOSS, Márcio Felipe; FESTUGATO, Lucas. Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**. Reston, p. 759-763. mai. 2010.

CONSOLI, Nilo César *et al.* Studies on the Dosage of Fiber-Reinforced Cemented Soils. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. McLean, p. 1624-1632. dez. 2011.

Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000343>. Acesso em: 18 fev. 2022.

CONSOLI, Nilo César. **A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils**. Porto Alegre: Elsevier, 2013. CONSOLI, Nilo César *et al.* Studies on the Dosage of Fiber-Reinforced Cemented Soils. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. McLean, p. 1624-1632. dez. 2011. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000343>. Acesso em: 18 fev. 2022.

CORREIA, António Alberto Santos; OLIVEIRA, P.J. Venda; LEMOS, L.J.L.. Strength assessment of chemically stabilised soft soils. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**. Coimbra, p. 218-227. jun. 2019.

COSTA, Fernando Febeliano da. **Tecnologia Mecânica**. Centro Paula Souza, São Paulo, 2000.

CP V-ARI: Cimento Portland de alta resistência inicial. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-v-ari/>. Acesso em: 16 fev. 2022.

CRUZ, Rodrigo Caberlon. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. 216 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Ufrgs, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/13462>. Acesso em: 09 jan. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro: Dnit, 2006.

FERNANDES, Idário. **Blocos e Pavers: produção e controle de qualidade**. 8. ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Ltda., 2019. 200 p.

FOX, Patrick J.; MAST, David G.. **GEOTECHNICAL PERFORMANCE OF A HIGHWAY EMBANKMENT CONSTRUCTED USING WASTE FOUNDRY SAND**. West Lafayette: Purdue University, 1998.

GEDIK, Abdulgazi; LAV, Musaffa; LAV, Abdullah Hilmi.. **Utilization of waste foundry sand as pavement sub-base and fill material**. Istambul: Springer, 2008. 5 p.

GEDIK, Abdulgazi; LAV, Abdullah Hilmi; LAV, Musaffa Aysen. Investigation of alternative ways for recycling waste foundry sand: an extensive review to present benefit. **Canadian Journal Of Civil Engineering**. Otawwa, p. 423-434. jan. 2018.



GUEDES, Carmen; CORRER, Caryna Januario; LOBO, Ilza; ABI-SAAB, Otavio Jorge Grigoli. Tratamento de Solo Contaminado com Petróleo Utilizando Tensoativos e Peróxido de Hidrogênio. In: **Semina: Exact and Technological Sciences**, v. 31, n. 2, p. 87-100, jul./dez. 2010.

GUÉRIOS, Eduan Maganhotto. **ESTUDO DO MELHORAMENTO DE SOLO COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA PARA USO EM PAVIMENTO URBANO**. 2013. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Cap. 2.

HARALAMBOS, Saroglou I. **Compressive Strength of Soil Improved with Cement**. Athens: National Technical University Of Athens, 2009. 8 p.

HEINECK, Karla Salvagni; IBEIRO, Lidiane; AZAMBUJA, Rafael Menna Barreto. COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE SOLO-BENTONITA E SOLO-CIMENTO-BENTONITA PARA A APLICAÇÃO EM BARREIRAS DE CONTENÇÃO DE CONTAMINANTES. **Geotecnia**, Lisboa, v. 136, p. 95-112, mar. 2016. Disponível em: <https://spgeotecnia.pt/uploads/jgeot201613606.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2022.

HEIDEMANN, Marcelo; NIERWINSKI Helena Paula, HASTENPFLUG, Daniel, BARRA, Breno Salgado, PEREZ, Yader Guerrero. Geotechnical behavior of a compacted waste foundry sand. **Construction And Building Materials**. Joinville, p. 122267-122278. 09 jul. 2020

JOHANN, Amanda dalla Rosa. Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura. 2013. 273 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013

KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez; FABBRI, Glauco Tulio Pessa. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. **Transportes**, São Carlos, v. XVII, n. 2, p. 36-45, dez. 2009. Quadrimestral.

LAGUROS, Joakim George. **EFFECT OF CHEMICALS ON SOII-CEMENT STABILIZATION**. 1962. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil Engineering, Iowa State University Of Science And Technology, Ames, 1962.

LITTLE, Dallas N.. **EVALUATION OF STRUCTURAL PROPERTIES OF LIME STABILIZED SOILS AND AGGREGATES**. [S.L]: National Lime Association, 1999.

LO RÉ, V. Areias de Fundição: generalidades, classificação, técnicas de preparo, componentes. In: **Fundição**. SIEGEL coord. Associação Brasileira de Metais- ABM. 10 ed. Aula n.8, 1978.

MITCHELL, James K. Soil improvement – State-of-the-art report. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1981, Estocolmo. **Proceedings [...]**. Estocolmo: Issmge', 1981. v. 4, p. 509-565.

MORAES, Carlos Alberto Mendes; CALHEIRO, Daiane; PIRES, Daniel Canello; NUNES, Suzete Schneider; LORSCHHEITTER, Giovane. Avaliação de areia fenólica usada de fundição regenerada em escala industrial por método mecânico. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 3., 2012, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Editora, 2012. p. 1-8.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **Processos de Fabricação: fundição**. Florianópolis: Cefet, 2007.

MASCARENHAS FILHO, Paulo José Carvalho. **FUNDIÇÃO EM AREIA A VERDE: uma abordagem experimental**. 2016. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016. Disponível em: [https://www2.ufrb.edu.br/bcet/components/com\\_chronoforms5/chronoforms/uploads/tcc/20190327172930\\_2015.2\\_-\\_TCC\\_Paulo\\_Mascarenhas\\_Filho\\_-\\_Fundio\\_Em\\_Areia\\_A\\_Verde\\_Uma\\_Abordagem\\_Experimental.pdf](https://www2.ufrb.edu.br/bcet/components/com_chronoforms5/chronoforms/uploads/tcc/20190327172930_2015.2_-_TCC_Paulo_Mascarenhas_Filho_-_Fundio_Em_Areia_A_Verde_Uma_Abordagem_Experimental.pdf). Acesso em: 05 mar. 2022.

ONYELOWE, Kennedy C; OKAFOR, Fidelis O. A COMPARATIVE REVIEW OF SOIL MODIFICATION METHODS. **Arpn Journal Of Earth Sciences**. Ipswich, p. 36-41. nov. 2012

PENKAITIS, Gabriela; SÍGOLO, Joel Barbujianni. **Resíduo de areia de fundição. Caracterização e implicação ambiental**. **Geologia USP**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 57-70, dez. 2012.

RELATÓRIOS de ensaio. Balsa Nova: Cimento Itambé, 2021. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=371&chave=2021-8>. Acesso em: 22 fev. 2022.

REUS, Amanda. **COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE AREIAS DE FUNDIÇÃO VISANDO APLICAÇÕES EM PAVIMENTOS**. 2021. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/223363>. Acesso em: 16 set. 2021.

SANTA CATARINA (Estado). **Lei Nº 17479**: Dispõe sobre a utilização das Areias Descartadas de Fundação (ADF). Florianópolis, SC, 16 jan. 2018

SANTOS, Lucas Coelho dos. **ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO ATRAVÉS DA INCORPORAÇÃO DE AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO RESIDUAL**. 2015. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/157265>. Acesso em: 19 mar. 2022.

TORRES, Anthony. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. **Construction And Building Materials**. Amsterdã, p. 674-681. mar. 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Biblioteca Universitária. **Normalização de trabalhos acadêmicos**. Florianópolis, 2016.

YIN, Jie; SOLEIMANBEIGI, Ali; LIKOS, William J.; Edil, Tuncer B.. Compression Behavior of Foundry Sands. In: GEOTECHNICAL AND STRUCTURAL ENGINEERING CONGRESS, 1., 2016, Phoenix. **Anais [...]**. Phoenix: Asce, 2016. p. 1392-1403.

ZIRSCHKY, J.; PIZNAR, M.. CEMENT STABILIZATION OF FOUNDRY SANDS. **Journal Of Environmental Engineering**. McLean, p. 715-718. jun. 1988.

## APÊNDICE A – Tabela de dosagem

Moldagem - 1 cp							
Ci (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	Massa de solo	Massa de cimento (g)	Massa de água (g)	Massa por camada (g)	Peso úmido do CP (g)
3	1.785	11.5	391.78	11.75	46.41	136.34	409.03
6	1.785	11.5	380.69	22.84	46.41	136.34	409.03
9	1.785	11.5	370.21	33.32	46.41	136.34	409.03
12	1.785	11.5	360.30	43.24	46.41	136.34	409.03
15	1.785	11.5	350.90	52.63	46.41	136.34	409.03

## APÊNDICE B – Tabela de Resultados

Teor de cimento (%)	7 dias												
	Peso (g)	hm (mm)	d(mm)	Vs (mm <sup>3</sup> )	$\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	$\eta$	civ	$\eta/civ$	Leitura	$\sigma$ (kpa)	$\sigma_m$ (kPa)
3.00	408.32	101.20	51.30	209.17	1.95	1.75	0.50	33.23	1.65	20.134	55.00	473.65	466.09
	407.86	100.30	51.50	208.93	1.95	1.75	0.50	33.22	1.65	20.132	55.00	469.98	
	407.98	100.50	51.40	208.54	1.96	1.75	0.49	33.08	1.65	20.000	53.00	454.65	
6.00	408.15	100.40	51.30	207.52	1.97	1.76	0.53	34.63	3.23	10.716	120.00	1033.42	968.61
	408.23	100.20	51.20	206.30	1.98	1.77	0.52	34.23	3.25	10.528	108.00	933.71	
	408.23	100.10	51.30	206.90	1.97	1.77	0.52	34.42	3.24	10.617	109.00	938.69	
9.00	407.97	100.30	51.40	208.12	1.96	1.76	0.58	36.64	4.70	7.799	139.00	1192.39	1145.21
	407.73	99.80	51.40	207.08	1.97	1.77	0.57	36.36	4.72	7.705	137.50	1179.52	
	407.53	100.20	51.40	207.91	1.96	1.76	0.58	36.64	4.70	7.800	124.00	1063.72	
12.00	407.48	99.90	51.30	206.49	1.97	1.77	0.61	37.92	6.14	6.179	238.00	2049.62	1594.47
	407.46	100.70	51.60	210.58	1.93	1.74	0.64	39.13	6.02	6.503	170.00	1447.04	
	406.95	98.90	51.40	205.22	1.98	1.78	0.60	37.62	6.17	6.100	150.00	1286.75	
15.00	408.39	100.00	51.40	207.50	1.97	1.77	0.66	39.70	7.45	5.328	226.00	1938.71	1933.33
	408.00	100.00	51.40	207.50	1.97	1.76	0.66	39.76	7.44	5.341	224.00	1921.55	
	407.88	99.80	51.50	207.89	1.96	1.76	0.66	39.89	7.43	5.370	227.00	1939.73	

Teor de cimento (%)	14 dias												
	Peso	hm (mm)	d(mm)	Vs(mm <sup>3</sup> )	$\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	$\eta$	civ	$\eta/civ$	Leitura	$\sigma$ (kpa)	$\sigma_m$
3.00	407.70	100.40	51.20	206.71	1.97	1.77	0.48	32.53	1.67	19.512	55.00	475.50	493.71
	407.57	100.50	51.50	209.35	1.95	1.75	0.50	33.40	1.65	20.296	55.20	471.69	
	408.05	100.70	51.30	208.14	1.96	1.76	0.49	32.94	1.66	19.874	62.00	533.93	
6.00	408.13	99.90	51.40	207.29	1.97	1.77	0.53	34.56	3.23	10.683	124.00	1063.72	1012.03
	408.12	100.60	51.30	207.93	1.96	1.76	0.53	34.76	3.22	10.780	105.00	904.24	
	408.10	100.60	51.50	209.56	1.95	1.75	0.54	35.27	3.20	11.024	125.00	1068.13	
9.00	408.64	100.00	51.40	207.50	1.97	1.77	0.57	36.34	4.72	7.700	168.00	1441.16	1428.14
	408.22	100.00	51.40	207.50	1.97	1.76	0.57	36.41	4.71	7.722	168.00	1441.16	
	408.37	100.20	51.80	211.16	1.93	1.73	0.60	37.49	4.63	8.089	166.00	1402.10	
12.00	406.92	99.10	51.20	204.03	1.99	1.79	0.59	37.26	6.20	6.008	271.00	2342.93	2333.45
	407.33	99.70	51.40	206.88	1.97	1.77	0.61	38.06	6.12	6.216	267.00	2290.42	
	408.38	100.00	51.50	208.31	1.96	1.76	0.62	38.33	6.10	6.287	277.00	2366.98	
15.00	407.51	98.70	51.50	205.60	1.98	1.78	0.65	39.27	7.50	5.234	320.00	2734.42	2717.19
	407.78	99.40	51.30	205.45	1.98	1.78	0.64	39.19	7.51	5.216	291.00	2506.04	
	407.23	98.50	51.60	205.98	1.98	1.77	0.65	39.43	7.48	5.268	342.00	2911.10	

Teor de cimento (%)	28 dias												
	Peso (g)	hm (mm)	d (mm)	Vs(mm <sup>3</sup> )	$\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	$\eta$	civ	$\eta/civ$	Leitura	$\sigma$ (kpa)	$\sigma_m$ (kPa)
3.00	407.61	100.70	51.70	211.40	1.93	1.73	0.52	34.04	1.63	20.885	73.00	618.97	602.41
	407.89	100.20	51.20	206.30	1.98	1.77	0.48	32.37	1.67	19.364	66.00	570.60	
	408.00	100.40	51.40	208.33	1.96	1.76	0.49	33.01	1.66	19.937	72.00	617.64	
6.00	407.85	100.20	51.50	208.72	1.95	1.75	0.54	35.05	3.21	10.918	128.00	1093.77	1100.89
	408.23	100.10	51.40	207.71	1.97	1.76	0.53	34.67	3.23	10.738	128.00	1098.03	
	407.94	100.20	51.50	208.72	1.95	1.75	0.54	35.04	3.21	10.911	130.00	1110.86	
9.00	407.99	100.20	51.50	208.72	1.95	1.75	0.58	36.82	4.68	7.859	175.00	1495.39	1547.36
	407.99	99.90	51.60	208.91	1.95	1.75	0.58	36.87	4.68	7.878	195.00	1659.84	
	407.82	100.00	51.50	208.31	1.96	1.76	0.58	36.72	4.69	7.826	174.00	1486.84	
12.00	408.36	100.00	51.30	206.69	1.98	1.77	0.61	37.85	6.14	6.160	315.00	2712.73	2657.09
	408.32	99.20	51.40	205.84	1.98	1.78	0.60	37.60	6.17	6.095	309.00	2650.71	
	408.30	99.90	51.40	207.29	1.97	1.77	0.61	38.04	6.13	6.210	304.00	2607.82	
15.00	408.12	99.30	51.50	206.85	1.97	1.77	0.65	39.55	7.47	5.295	375.00	3204.40	3133.95
	407.83	99.10	51.40	205.63	1.98	1.78	0.65	39.24	7.51	5.226	349.00	2993.84	
	407.60	98.80	51.30	204.21	2.00	1.79	0.64	38.85	7.56	5.141	372.00	3203.60	

### ANEXO A – Ensaios de Lixiviação e Solubilização

Resultados Típicos de testes de lixiviação e solubilização de ADF e valores limites estabelecidos no padrão brasileiro para classificação de resíduos sólidos

Elementos	Lixiviação		Solubilização	
	Concentração (mg/L)	Valor Limite* (mg/L)	Concentração (mg/L)	Valor Limite* (mg/L)
Al	-	-	154	0,2
As	<0.01	0,01	<0.01	0,01
Ba	1.65	70	1,15	0,7
Cd	<0.001	5,0	<0.001	0,005
Pb	0.043	1,0	0,057	0,01
Cianeto	-	-	<0,05	0,07
Cloreto	-	-	43,9	250
Cu	-	-	0,126	2,0
Cr	0.068	5	0,13	0,05
Fe	-	-	99	0,3
Índice de Fenóis	-	-	0.4	0,01
Mn	-	-	1.05	0,1
Hg	0.0039	0,1	0.0003	0,001
Ag	<0.01	5	<0,01	0,05
Se	<0.008	1,0	<0,008	0,01
Na	-	-	143	200
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	-	140	250
Surfactantes	-	-	<0,1	0,5
Zn	-	-	0,569	5,0

Observações: o símbolo “ - ” indica que as substâncias não foram avaliadas nos testes de lixiviação de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 10004



\*Valores definidos pela norma brasileira ABNT NBR 10004  
Fonte: Heidemann et al (2021)