

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

ANA CAROLINA DE SOUZA MARTINS

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E  
DURABILIDADE DE UM REJEITO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA COM  
INSERÇÃO DE AGENTE CIMENTANTE**

Joinville

2019

ANA CAROLINA DE SOUZA MARTINS

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E  
DURABILIDADE DE UM REJEITO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA COM  
INSERÇÃO DE AGENTE CIMENTANTE**

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.

Orientadora: Dra. Helena Paula Nierwinski

Joinville

2019

**ANA CAROLINA DE SOUZA MARTINS**

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, 05 de Julho de 2019.

---

Prof. Dr. Marcelo Heidemann

Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dra. Helena Paula Nierwinski

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Marcelo Heidemann

Co - Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Me. Jonatas Sosnoski

Universidade Estadual de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Universidade Federal de Santa Catarina

*“Um dia quando olhares para trás, verás que os dias mais belos foram aqueles em que lutaste”*

***Sigmund Freud***

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que de muitas maneiras foi o meu principal aliado e a fonte de motivação para a finalização desse trabalho. Aos meus familiares que estiveram presente durante toda essa jornada da graduação me apoiando de todas as maneiras possíveis e principalmente aos meus avós que infelizmente não puderam estar presentes para ver a conclusão dessa etapa.

A Professora Helena Paula Nierwinski, minha orientadora, que com toda a sua capacidade e incrível paciência me auxiliou impecavelmente por todo o processo de pesquisa, sem contar os grandes ensinamentos transmitidos ao longo do curso. Ao Professor Marcelo Heidemann, co-orientador, que da mesma maneira me auxiliou com toda disponibilidade possível e por sua grande didática, competência e conhecimentos transmitidos ao longo das disciplinas da graduação.

A todos os meus demais professores da Universidade Federal de Santa Catarina que transmitiram seus conhecimentos e contribuíram de forma essencial para a minha formação. Além de todos os funcionários presentes na instituição que me atenderam de alguma forma ao longo do curso.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos e ao Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina que forneceram todos os materiais e instrumentos possíveis para a seguinte pesquisa e aos auxílios dos bolsistas dos laboratórios que sempre estiveram me ajudando de alguma forma.

E por fim, a todos os meus amigos presentes ao longo de toda a graduação, que serviram de grande incentivo e motivação para as longas noites de estudo, além de todos os grandes momentos vivenciados e por cada etapa finalizada juntos.

Muito Obrigada.

## RESUMO

No presente trabalho se avalia e compara através de ensaios laboratoriais, as modificações nas características de comportamento do rejeito de minérios de bauxita quando adicionados cimento Portland CP II-Z-32 em sua composição. O conhecimento e estudo dessas modificações são de extrema importância para a possível utilização desses rejeitos em outras áreas, devido principalmente aos impactos ambientais causados pelo armazenamento desses despojos. Os corpos de prova elaborados para a seguinte pesquisa foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples e ensaios de durabilidade para averiguar as características do comportamento da mistura. Para o ensaio de resistência à compressão simples foram moldados corpos de prova com três valores de peso específico aparente seco ( $1,2 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,25 \text{ g/cm}^3$  e  $1,3 \text{ g/cm}^3$ ), devido à esses valores serem próximos ao da umidade ótima encontrada, e cinco teores de cimento (3%, 5%, 7%, 9% e 11%). Em seguida os corpos de prova foram rompidos em compressão simples após 7 dias de cura. Para o ensaio de durabilidade foram elaborados corpos de prova com três valores de peso específico aparente seco ( $1,2 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,25 \text{ g/cm}^3$  e  $1,3 \text{ g/cm}^3$ ) e apenas um teor de cimento de 7%. Após a etapa de moldagem as amostras foram submetidas a ciclos de molhagem, secagem e escovação. Os resultados mostraram que para o ensaio de resistência à compressão simples, foi verificado que apenas valores a partir de 7% de porcentagem de cimento em massa, foi possível a realização do ensaio proposto, chegando-se a valores considerados adequados de resistência à compressão. Já para o ensaio de durabilidade, devido aos resultados do ensaio de resistência à compressão apresentarem bons resultados apenas para teores a partir de 7%, foi avaliado a condição mais crítica, ou seja, com corpos de prova com menor inserção de cimento (7%), sendo possível verificar a grande influência da densidade e da porosidade do material em relação a durabilidade do material. Além disso, foi verificado que para ambos os ensaios, foi apresentado um equacionamento com confiabilidade ótima à mediana para estimativa de propriedades para diferentes condições de ensaio.

**Palavras-chave:** Rejeitos de Minérios. Bauxita. Agentes Cimentantes.

## ABSTRACT

The present work evaluates and compares, through laboratory tests, the modifications in the behavior characteristics of the bauxite ore tailings when cement is added in its composition. The knowledge and study of these modifications are of extreme importance for the possible use of these wastes in other areas, mainly due to the environmental impacts caused by the storage of these remains. The specimens prepared for the following research were submitted to simple compressive strength tests and durability tests to ascertain the behavior characteristics of the mixture. For the simple compression strength test specimens with three values of specific dry weight ( $1.2 \text{ g / cm}^3$ ,  $1.25 \text{ g / cm}^3$  and  $1.3 \text{ g / cm}^3$ ) were molded, these values being close to humidity and cement (3%, 5%, 7%, 9% and 11%). Then the specimens were ruptured in simple compression after 7 days of cure. For the durability test, specimens with three values of specific dry weight ( $1.2 \text{ g / cm}^3$ ,  $1.25 \text{ g / cm}^3$  and  $1.3 \text{ g / cm}^3$ ) and only a cement content of 7% were prepared. After the molding step the samples were submitted to wet, dry and brush cycles. The results showed that, for the simple compressive strength test, it was verified that only values from 7% of cement mass, it was possible to perform the proposed test, reaching values considered suitable for compressive strength. For the test of durability, because the results of the compressive strength test presented good results only for contents from 7%, the most critical condition was evaluated, that is, with specimens with lower cement insertion (7%), being possible to verify the great influence of the density and the porosity of the material in relation to the durability of the material. In addition, it was verified that for both tests, an equation with optimal reliability was presented at the median for estimating properties for different test conditions.

**Keywords:** Ore Rejects, Bauxite, Cementing Agents.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>17</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>17</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1. Objetivos .....</b>	<b>17</b>
<i>1.1.1. Objetivo Geral .....</i>	<i>17</i>
<i>1.1.2. Objetivos Específicos .....</i>	<i>17</i>
<b>1.2. Delimitação Do Espaço Da Pesquisa .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3. Relevância Do Tema .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4. Organização Do Trabalho .....</b>	<b>23</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. Rejeito De Mineração De Bauxita .....</b>	<b>24</b>
<i>2.1.1. Conceitos Gerais.....</i>	<i>24</i>
<i>2.1.2. Produção.....</i>	<i>28</i>
<i>2.1.3. Armazenamento e Riscos Associados .....</i>	<i>31</i>
<b>2.2. Melhoramento De Solos.....</b>	<b>36</b>
<i>2.2.1. Conceitos Gerais.....</i>	<i>36</i>
<i>2.2.2. Relação <math>\eta</math>/Civ.....</i>	<i>38</i>
<i>2.2.3. Resistência à Compressão .....</i>	<i>40</i>
<i>2.2.4. Durabilidade .....</i>	<i>43</i>
<i>2.2.5. Tensão e Deformação .....</i>	<i>46</i>
<b>2.3. Caracterização Geotécnica.....</b>	<b>47</b>
<i>2.3.1. Análise Granulométrica.....</i>	<i>47</i>
<i>2.3.2. Plasticidade e Limites de Attenberg (LL e LP).....</i>	<i>52</i>
<i>2.3.3. Compactação .....</i>	<i>56</i>
<i>2.3.4. Densidade Real dos Grãos (G).....</i>	<i>57</i>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>60</b>
<b>3.1. Materiais .....</b>	<b>60</b>
<i>3.1.1. Rejeito de Mineração de bauxita .....</i>	<i>60</i>
<i>3.1.2. Cimento .....</i>	<i>61</i>
<i>3.1.3. Água destilada .....</i>	<i>61</i>
<b>3.2. Metodologia .....</b>	<b>61</b>

3.2.1. Programa Experimental.....	62
<b>3.3. Dosagem.....</b>	<b>63</b>
<b>3.4. Ensaio De Resistência À Compressão Simples.....</b>	<b>65</b>
<b>3.5. Ensaio De Durabilidade.....</b>	<b>70</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>74</b>
<b>4.1. Caracterização Do Rejeito De Mineração De Bauxita .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2. Ensaio De Resistência À Compressão Simples.....</b>	<b>76</b>
4.2.1. Efeito do Teor de Cimento .....	76
4.2.2. Efeito da Porosidade.....	80
<b>4.3. Relação Tensão-Deformação.....</b>	<b>82</b>
<b>4.4. Modo de Ruptura.....</b>	<b>86</b>
<b>4.5. Ensaio de Durabilidade .....</b>	<b>87</b>
<b>4.6. Relação Entre Resistência à Compressão Simples e Durabilidade .....</b>	<b>93</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>94</b>
<b>5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>92</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>96</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barragens Cadastradas por uso principal em 30 de setembro de 2015 .....	19
Figura 2 - Localização e classificação de Barragens de Rejeitos de mineração brasileiras .....	20
Figura 3 - Acidentes e incidentes ocorridos entre 2011 e 2016 .....	20
Figura 4 - Número de vítimas fatais entre os anos de 2011 e 2016 devido a acidentes em barragens .....	21
Figura 5 – Região de Brumadinho após a catástrofe.....	22
Figura 6 – Relação da bauxita e a indústria de alumínio .....	24
Figura 7 - Minério de Bauxita.....	25
Figura 8 - Localização das minas e refinarias em operação no Brasil .....	27
Figura 9 - Exemplificação ilustrativa do processo de Bayer (refino da bauxita).....	28
Figura 10 - Barragem de bauxita na área industrial da MRN dentro da floresta Nacional Saracá-Taquera (PA).....	32
Figura 11 - Exemplo de formas de disposição dos rejeitos em barragens .....	33
Figura 12 - Foto aérea mostrando a devastação do distrito de Bento Rodrigues, Município de Mariana (MG).....	34
Figura 13 - Avaliação do efeito da aplicação de diferentes agentes cimentantes na estabilização de solos nórdicos .....	37
Figura 14 - Resistência à compressão simples em função do tipo e da quantidade de material cimentante numa turfa.....	38
Figura 15 - Relação de vazios/cimento ( $\eta/Civ$ ) versus resistência a compressão simples ( $qu$ ) pelo método proposto por Lanarch (1960) .....	39
Figura 16 - Relação entre o teor de cal empregado nas amostras e a resistência à compressão simples.....	41
Figura 17 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento adicionado .....	42
Figura 18 - Variação da resistência à compressão com relação vazios/cimento.....	43
Figura 19 - Perda de massa acumulada em função do número de ciclos em rejeito de mineração de ouro tratado com cimento e fibra com variação da densidade do material .....	44
Figura 20 - Perda de massa acumulada em função do número de ciclos em rejeito de mineração de ouro tratado com diferentes teores de cimento e diferentes densidades .....	45
Figura 21 – Perda de massa em função do ciclo .....	45
Figura 22 - Relação entre a perda de massa acumulada (ALM) e a porosidade/teor volumétrico de cimento.....	46
Figura 23 - Curva tensão-deformação dos corpos-de-prova com $\gamma_d=1,73 \text{ g/cm}^3$ .....	47
Figura 24 - Exemplo de Curva de distribuição granulométrica do solo .....	48

Figura 25 - Curva granulométrica de rejeito de bauxita.....	51
Figura 26 - Curva granulométrica do rejeito de mineração de bauxita.....	51
Figura 27 - Curvas granulométricas obtidas com e sem o uso de defloculante em amostras de minério de Bauxita .....	52
Figura 28 - Ilustração dos estados físicos ou estados de consistência .....	53
Figura 29 - Aparelho Casagrande .....	54
Figura 30 - Determinação do valor do Limite de Liquidez.....	54
Figura 31 - Ilustração da elaboração do ensaio de avaliação do Limite de Plasticidade do material.....	55
Figura 32 - Exemplo de curva de compactação obtida em um ensaio Proctor .....	57
Figura 33 - Rejeito de Bauxita na etapa de secagem do material na estufa .....	61
Figura 34 - Dissolução total das amostras de rejeito com cimento (3 e 5% em massa) na etapa de saturação .....	66
Figura 35 - Etapa de saturação para as porcentagens de 7% de cimento, sem a ocorrência de dissolução das amostras.....	67
Figura 36 - Molde Bipartido Confeccionado .....	68
Figura 37 - Exemplo de corpo de prova desenvolvido para o ensaio de Resistência à compressão simples.....	69
Figura 38 - Amostras ensacadas e devidamente vedadas.....	69
Figura 39 - Prensa utilizada para ruptura dos corpos de prova .....	70
Figura 40 - Exemplo de corpo-de-prova moldado para o ensaio de durabilidade .....	71
Figura 41 - Molde para ensaio CBR para a moldagem das amostras utilizadas no ensaio de Durabilidade.....	71
Figura 42 - Exemplo da etapa de escovação no ensaio de durabilidade .....	73
Figura 43 - Curva Granulométrica do rejeito de mineração de bauxita .....	74
Figura 44 - Resultado do ensaio de compactação por Proctor Normal.....	75
Figura 45 - Variação da resistência à compressão em função do teor de cimento incorporado .....	79
Figura 46 - Variação da resistência a compressão simples em função do teor volumétrico de cimento .....	80
Figura 47 - Variação da resistência em função da porosidade.....	81
Figura 48 - Variação da Resistência a compressão em função do $\eta /Civ^{0,28}$ .....	82
Figura 49 - Variação da tensão-desvio em função da deformação para $\gamma_d$ de 1,2 g/cm <sup>3</sup> em escala menor.....	83
Figura 50 - Variação da tensão-desvio em função da deformação para $\gamma_d$ de 1,2 g/cm <sup>3</sup> em escala maior.....	84
Figura 51 - Variação da tensão-desvio em função da deformação para $\gamma_d$ de 1,25 g/cm <sup>3</sup> .....	85

Figura 52 - Variação da tensão-desvio em função da deformação para $\gamma_d$ de 1,30 g/cm <sup>3</sup> .....	86
Figura 53 - Plano de Ruptura para amostra com $\gamma_d$ de 1,20 g/cm <sup>3</sup> e teor de cimento de 9% ...	87
Figura 54 - Plano de Ruptura para amostra com $\gamma_d$ de 1,30 g/cm <sup>3</sup> e teor de cimento de 11% .	87
Figura 55 - Variação da Perda de Massa em função do Número de Ciclos.....	88
Figura 56 - Perda de massa por ciclo em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) do material.....	89
Figura 57 - Variação da porcentagem de perda acumulada em função do número de ciclos. .	90
Figura 58 - Variação da porcentagem de perda acumulada em função do número de ciclos ..	91
Figura 59 - Variação da porcentagem de perda de massa acumulada em função da resistência a compressão da amostra.....	92
Figura 60 - Variação da porcentagem de perda de massa acumulada normalizada pelo número de ciclos em função de $\eta / C_{iv}^{0,28}$ .....	93
Figura 61 - Variação da perda de massa acumulada em função da resistência a compressão .	94

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Proporção de minerais presentes na bauxita em diferentes áreas da indústria.....	26
Tabela 2 - Panorama global de maiores reservas e países produtores de bauxita.....	26
Tabela 3 - Principais empresas que atuam no setor de mineração de bauxita no Brasil.....	27
Tabela 4 - Composição da Lama Vermelha em distintos Países.....	31
Tabela 5 - Classificação de solos de acordo com faixas de tamanho de grãos .....	50
Tabela 6 - Distribuição granulométrica e variação dos índices físicos .....	55
Tabela 7 - Resumo dos resultados dos ensaios de laboratório realizados com rejeito de mineração de bauxita.....	56
Tabela 8 – Variação de índices físicos de acordo com o material proveniente do rejeito de bauxita .....	59
Tabela 9 – Dosagem das quantidades das misturas com incorporação de cimento .....	65
Tabela 10 - Dosagem das quantidades das misturas com incorporação de cimento.....	65
Tabela 11 - Índices Físicos encontrados para o rejeito de bauxita.....	75
Tabela 12 - Resumo dos Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....	76

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Incidentes e possíveis causas de rompimento de estruturas de barragens no Brasil .....	35
Quadro 2 - Esquematização de ensaios realizados com suas normas respectivamente. ....	62
Quadro 3 - Descrição das etapas realizadas por cada ciclo.....	72

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: *American Society for Testing and Mater*

Civ: teor de volumétrico de cimento, expresso em porcentagem do volume total.

e: índice de vazios.

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

LC: limite de contração

qu: resistência à compressão simples.

V<sub>ci</sub>: volume de cimento.

V<sub>v</sub>: volume de vazios (igual ao volume de água mais o volume de ar).

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

$\gamma_d$ : peso específico aparente seco.

$\gamma_g$ : peso específico das partículas.

$\gamma_w$ : peso específico da água

$\gamma_{nat}$ : peso específico natural

G: Densidade Real dos grãos

$\rho_s$ : Massa específica real do solo

$\eta$ : porosidade .

$\sigma_d$ : tensão desvio.

$\omega$ : teor de umidade.

$\epsilon_a$ : deformação axial.

## 1. INTRODUÇÃO

Os minerais constituem as matérias-primas mais requeridas pela civilização moderna. Sua utilização pode ser presenciada na indústria do aço, através da extração do ferro; indústria cerâmica, com a retirada de calcários e quartzos; além de insumos para construção civil e outras diversas áreas (MME, 2013).

Segundo o Ministério de Minas de Energia (2013), nem sempre esses minerais apresentam-se na natureza na forma em que serão consumidos pela indústria, quer seja por suas granulometrias ou por estarem associados a outros minerais, que não são de interesse ou são indesejáveis para o processo industrial, ao qual foram destinados.

O processo de beneficiamento do minério se constitui justamente na adequação dos minerais explorados aos processos industriais a que se destinam. Nesse procedimento, o material coletado é separado durante a atividade mineradora em duas partes: como exemplo, na produção de ferro o minério extraído é utilizado para a produção de pelotas; e partículas, como óxido de ferro, sílica, entre outras, resultantes do processo do beneficiamento desse minério - são nomeados como rejeitos e não possuem valor comercial, por isso e, por questões ambientais, precisam ser devidamente descartados e armazenados em locais designados (SANT'ANA, 2013).

Segundo Machado (2007), o rejeito proveniente do processo de beneficiamento, é frequentemente disposto a céu aberto ou em áreas demarcadas, contidas por meio de estruturas de contenção, denominadas de barragens de rejeitos. As barragens de rejeitos têm por objetivo de armazenar estes materiais, além da água proveniente do processo de beneficiamento de minérios (VALE, 2016).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2013) devido à atividade de mineração ser de natureza extrativista, os impactos ambientais da mesma são significativos, e estão relacionados à: quantidade de resíduos gerada; potenciais passivos por contaminação por uso de resíduos perigosos; modificações do habitat natural de espécies; barramento de rejeitos; efeitos da drenagem ácida de mina na qualidade da água e na fauna; potencial de acidentes decorrentes de rompimento de barragens de rejeitos ou pilhas de estéril, que podem ocorrer após o fechamento da mina; dentre outros. Para indústria de mineração, as barragens de rejeitos e o armazenamento de estéril são as áreas que representam mais impactos negativos e riscos para este setor (IBRAM, 2013).

Devido a essa grande preocupação de deposição adequada de rejeitos, Petry (2015) afirma que vem crescendo, nos últimos anos, o número de pesquisadores que se propõe a

estudar métodos de reciclagem, aproveitamento e tratamento para os mais diferentes tipos de resíduos, como Braga *et al.* (2012), Brito e Saikia (2013), Ling e Poon (2011), entre outros. Sendo esses estudos motivados principalmente pela aplicação de determinadas leis em relação ao destino final dos resíduos, com a finalidade da proteção do meio ambiente. Além disso, tem-se observado cada vez mais um aumento da procura pela sustentabilidade dos empreendimentos minerários (PETRY, 2015).

De acordo com Petry (2015) o aproveitamento e/ ou tratamento de resíduos possibilita um destino sustentável aos mesmos, o que evita a sua disposição em aterros ou até mesmo em locais inapropriados. No caso dos rejeitos de mineração, mesmo que estes não sejam reutilizados, a melhoria de suas propriedades pode, inclusive, contribuir para a melhoria da segurança das barragens.

Para tornar viável a utilização e/ ou tratamento de resíduos para os diferentes fins, são necessários estudos que possam avaliar suas propriedades, em relação à solicitações mecânicas, podendo-se citar: resistência à compressão, resistência à tração na compressão diametral, durabilidade, entre outras (PETRY, 2015).

Dentro desse contexto, o presente trabalho visa a avaliação da possível melhoria das propriedades e modificações nas características de rejeitos de mineração de bauxita, quando adicionado um agente cimentante em sua composição. Busca-se avaliar o acréscimo de resistência do material e características de durabilidade para dar suporte a uma possível utilização da mistura de rejeitos com agente cimentante em obras de aterro ou para promover o próprio aumento da estabilidade de barragens rejeitos.

## **1.1. Objetivos**

### *1.1.1. Objetivo Geral*

O trabalho tem como objetivo avaliar as características de resistência à compressão e durabilidade de um rejeito de minério de bauxita, com inserção de um agente cimentante.

### *1.1.2. Objetivos Específicos*

Para se alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são elaborados:

- Caracterização do rejeito de mineração e do agente cimentante;

- Avaliação e definição das porcentagens mínimas de adição do agente cimentante em massa de rejeito;
- Determinação da resistência à compressão simples de corpos de prova de rejeito tratados com diferentes porcentagens de cimento;
- Avaliação de características de durabilidade do material tratado através de ciclos de secagem e umedecimento;
- Análise da variação de resistência e durabilidade em relação ao valor de  $\eta/Civ$  (porosidade do material *versus* teor de agente cimentante adicionado) para rejeitos de mineração de bauxita;
- Apresentar equacionamento da variação de resistência e durabilidade em função do teor do agente cimentante acrescentado ao rejeito.

## 1.2. Delimitação Do Espaço Da Pesquisa

O desenvolvimento da seguinte pesquisa será em âmbito laboratorial, com o intuito de avaliar o comportamento da mistura de rejeitos quando adicionados em sua composição agentes cimentantes.

Os ensaios previstos para elaboração da pesquisa serão realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina, do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ).

## 1.3. Relevância Do Tema

Apesar de ser de grande importância socioeconômica, a indústria de mineração, interfere de forma intensa nos recursos naturais do meio ambiente, sendo que cada vez mais os mesmos sofrem progressivos impactos negativos, devido às ações antrópicas (VIDAL, 2001).

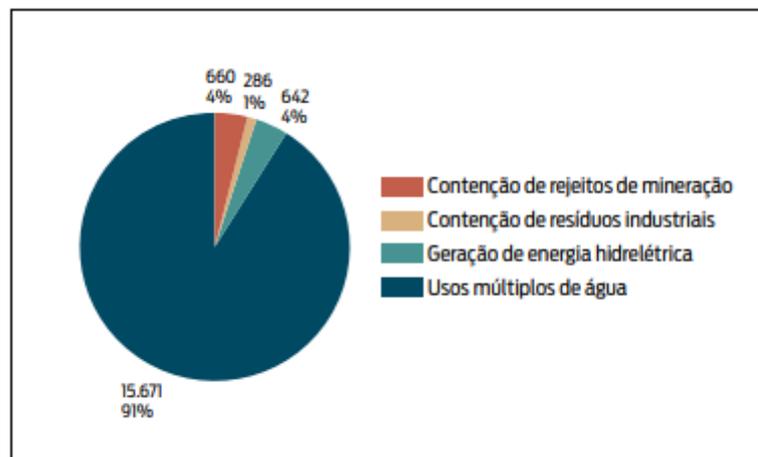
Com o aumento da preocupação ambiental relacionada à impactos ambientais, no ano de 2010 foi estabelecido pela Lei Federal número 12.334, o Relatório de Segurança de Barragens (RBS), o qual apresenta à sociedade um panorama da evolução da segurança das barragens no Brasil. No entanto, este relatório verificou que o número de barragens existentes em solo brasileiro ainda não é definitivo, mas diversos esforços vêm sendo realizados, com o

passar dos anos, para quantificar o total de empreendimentos e mapear os riscos inerentes à implantação dessas estruturas.

O Relatório Anual de Segurança de Barragens do ano de 2015 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2016) apresenta a existência de 17.259 barragens cadastradas construídas no território brasileiro (Figura 1). Dentro desse número constam barragens tanto para fins energéticos, como também para armazenamento de resíduos, usos industriais, entre outras (TSCHIEDEL, 2017).

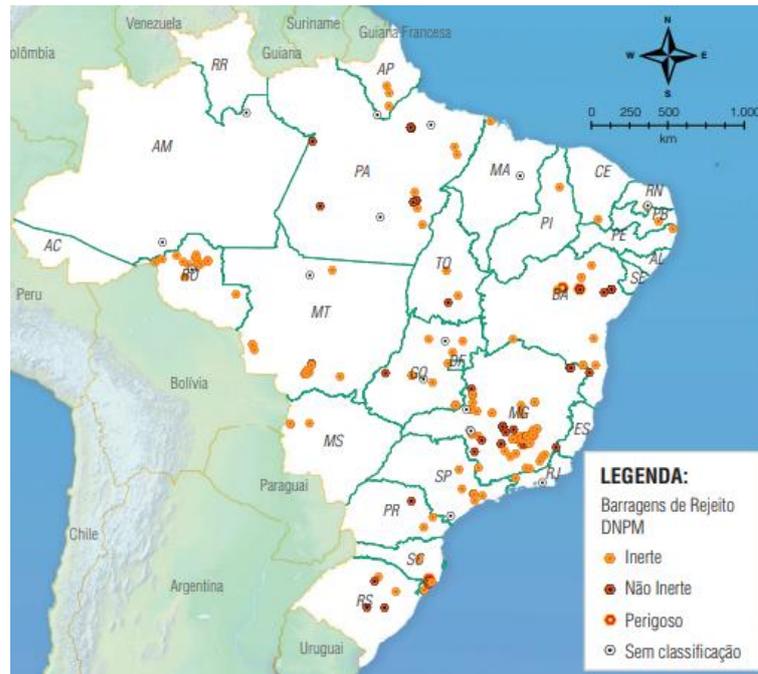
Segundo o cadastro do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014) foram cadastradas 264 barragens de rejeitos de mineração no Brasil. Entretanto, segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM/MG, 2013/2014), levantou-se um total de 450 barragens de rejeitos, somente no Estado de Minas Gerais. Este fato evidencia a quantidade de rejeitos de mineração que são armazenados e estocados por meio de barragens, sendo que a maioria dessas estruturas armazena, em média, 3 hm<sup>3</sup> de material (ANA, 2015). Através da Figura 2 é possível observar a distribuição das barragens de rejeitos de mineração por estado brasileiro e sua classificação quanto a questões de segurança, evidenciando o estado de Minas Gerais como o estado com maior presença destas estruturas.

Figura 1 – Barragens Cadastradas por uso principal em 30 de setembro de 2015.



Fonte: ANA (2015).

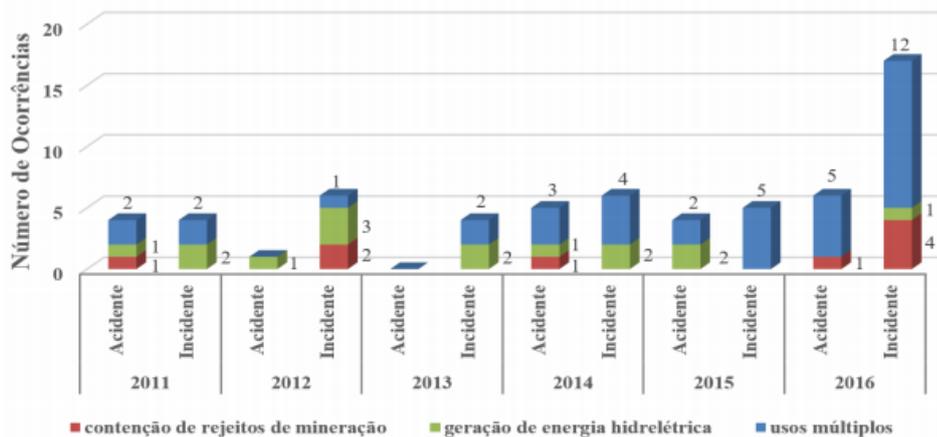
Figura 2 – Localização e classificação de barragens de rejeitos de mineração brasileiras.



Fonte: ANA (2011).

As possíveis ocorrências de rompimentos em barragens de rejeitos de mineração são apontadas como situações de alto potencial de danos, envolvendo não só perdas econômicas, mas também no risco de perdas de vidas humanas e destruição da fauna e da flora nas localidades à jusante da estrutura (BRASIL, 2010). De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2017), como relatado na Figura 3, é possível obter graficamente a diferença do número de acidentes e vítimas por ano, registradas pelo órgão fiscalizador, em relação à finalidade de uso principal de cada barragem.

Figura 3 – Acidentes e incidentes ocorridos entre 2011 e 2016.

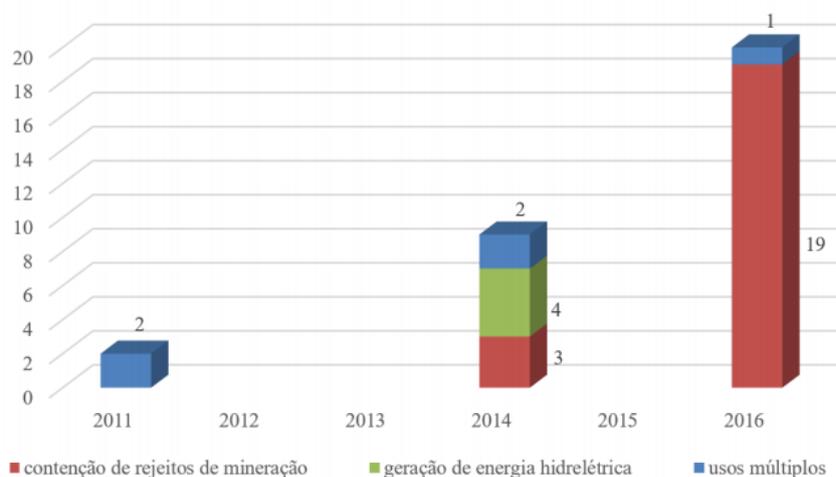


Fonte: Ana (2017).

Os acidentes com barragens estão longe de serem considerados apenas de âmbito atual. Mesmo que esses acontecimentos não ocorram de maneira rotineira, diversos casos já foram registrados não só no Brasil, mas também em países considerados desenvolvidos como Estados Unidos, Inglaterra, entre outros (AGUIAR, 2014). Os dois últimos casos ocorridos no Brasil, que foram as rupturas das barragens de Mariana e Brumadinho, no estado de Minas Gerais, são considerados alguns dos eventos mais catastróficos registrados com estes tipos de estruturas (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS- IBAMA, 2015).

O rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, da empresa Samarco, resultou em aproximadamente 34 hm<sup>3</sup> de rejeitos da mineração de ferro lançados na bacia do Rio Doce. Segundo o Ibama (2015) a catástrofe ocorrida foi responsável não apenas pela perda de vidas, mas também na degradação da fauna e da flora, principalmente grande parte da bacia do Rio Doce. Na Figura 4, é possível observar a direta influência desse acidente no elevado número de vítimas registrado em barragens de rejeitos, no relatório do ano de 2016.

Figura 4 – Número de vítimas fatais entre os anos de 2011 e 2016 devido a acidentes em barragens..



Fonte: ANA (2017).

O segundo grande episódio ocorrido no Brasil, aconteceu em Janeiro de 2019, sendo considerado o mais recente no país até o presente momento. Esta ruptura foi registrada na Barragem de rejeitos do Córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho, também no Estado de Minas Gerais (Figura 5). Segundo o Relatório de Missão Emergencial a Brumadinho (Conselho Nacional dos Direitos Humanos, 2019) a barragem possuía 12 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de mineração e após o seu rompimento a lama seguiu vale abaixo com uma velocidade acima de 70km/h soterrando casas, sítios e unidades do Córrego do Feijão e do

Parque de Cachoeira. Além da contaminação da água dos rios e o soterramento dos leitos dos rios, a tragédia contabilizou um total de 333 mortos e desaparecidos.

Figura 5 – Região de Brumadinho após a catástrofe.



Fonte: VEJA, 2019.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2016) o aproveitamento dos rejeitos, reduziria a quantidade de resíduos alocada nas barragens, diminuindo as dificuldades de manutenção e estabilidade e, em alguns casos, até mesmo tornando-as desnecessárias.

Nesse contexto, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2016) ainda afirma que a recuperação de rejeitos começa aos poucos a ganhar destaque. O desenvolvimento do programa Inova Mineral vem sendo articulado pela Financiadora de Estudos e Projetos e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o qual consiste em um plano de apoio tecnológico com o objetivo de trazer soluções baseadas em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) ao setor de mineração. Um dos focos do projeto é o estudo de agregação de valor em minerais estratégicos, processos eficientes e sustentáveis, recuperação de rejeitos e a utilização dos rejeitos para possíveis soluções tecnológicas, buscando minimizar o conteúdo das barragens ou até mesmo extinguí-las.

Diante dos riscos associados às barragens de rejeitos e o aumento de interesse em pesquisas com a reutilização e tratamento destes materiais, o presente trabalho justifica-se e apresenta relevância significativa ao realizar um estudo da melhoria de propriedades de um

rejeito de mineração com a adição de um agente cimentante. Tal avaliação poderá servir como um gatilho para uma possível utilização de rejeitos tratados em obras secundárias de engenharia ou para contribuir na estabilidade de barragens construídas com este material.

#### **1.4. Organização Do Trabalho**

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, conforme descritos sucintamente a seguir:

##### **Capítulo 1- Introdução:**

Introduz o assunto abordado, expõe os objetivos da pesquisa, além de apresentar a estruturação do trabalho em particular.

##### **Capítulo 2 – Referencial Teórico**

Apresenta a fundamentação teórica existente, referente aos tópicos principais sobre o rejeito de bauxita como conceitos gerais, armazenamento e produção. Além de apresentar conceitos sobre melhoramentos de solos como Caracterização Básica e Método de Dosagem. E por fim, referências de ensaios de durabilidade e resistência à compressão simples.

##### **Capítulo 3 – Metodologia**

Descreve os materiais e equipamentos utilizados, além da metodologia de ensaios adotada na pesquisa.

##### **Capítulo 4 – Resultados**

Apresentação e análises dos resultados obtidos através dos ensaios realizados.

##### **Capítulo 5 – Conclusão**

Apresentação das conclusões relacionadas aos resultados encontrados e recomendações para possíveis trabalhos futuros.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

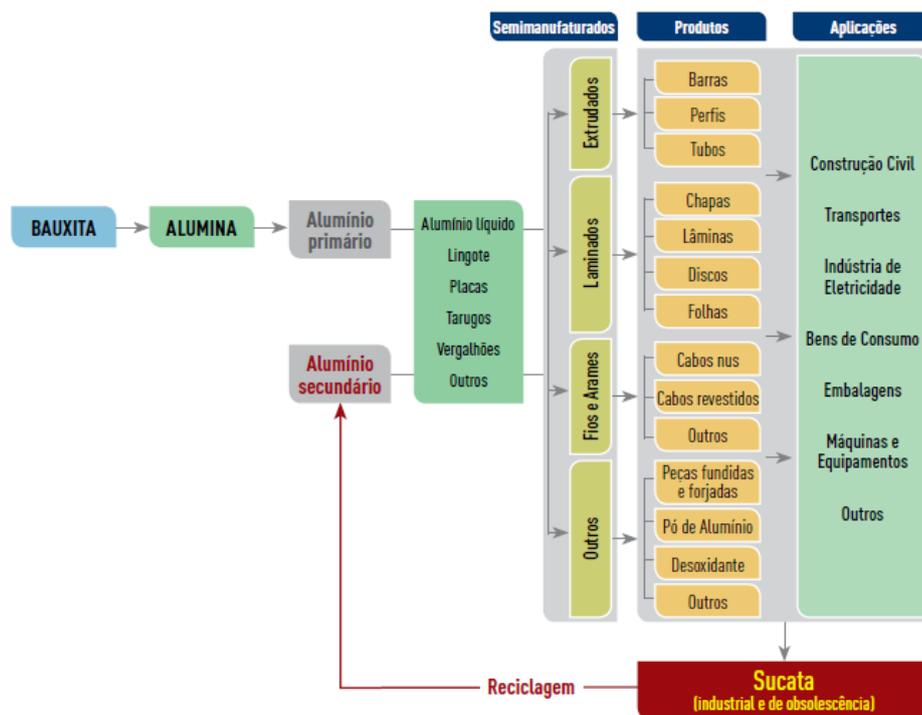
Esse capítulo tem como intuito apresentar conceitos gerais sobre o minério de bauxita, como também o método de produção e armazenamento do rejeito proveniente deste processo de extração. Além disso, apresentam-se conceitos relacionados ao melhoramento de solos, métodos de dosagem e comportamento de materiais em relação à durabilidade e resistência à compressão.

### 2.1. Rejeito De Mineração De Bauxita

#### 2.1.1. Conceitos Gerais

O nome bauxita se refere à cidade de Les Baux, na França, onde o minério foi identificado pela primeira vez, em 1821, pelo geólogo Pierre Berthier. É o minério a partir do qual se produz a alumina e, esta é usada para a produção do alumínio metálico (conforme esquema de produção apresentado na Figura 6) considerado o terceiro elemento em maior abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e silício.

Figura 6 - Relação da bauxita e a indústria de alumínio.

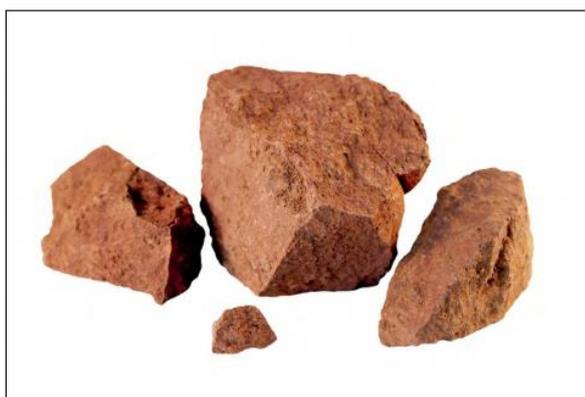


Fonte: Adaptado (ABAL, 2017).

A bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) em sua composição para que seja economicamente viável seu aproveitamento para o setor de mineração. Sendo que para se produzir 2 toneladas de alumina são necessárias de 5 a 7 toneladas de bauxita, que no final do processo são convertidas em 1 tonelada de alumínio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO - ABAL, 2017).

Segundo Antunes (2012) o minério é constituído essencialmente por hidróxidos de alumínio, óxidos e hidróxidos de ferro, caulinita ou haloisita, óxido de titânio e outros elementos. A maioria das bauxitas que são consideradas como economicamente aproveitáveis possuem um teor mínimo de Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) da ordem de 30 %. (SAMPAIO *et al*, 2005). Além disso, sua coloração pode variar entre o vermelho, o amarelo e o branco, com características opaca e terrosa, como mostra a Figura 7 (SANTOS, 1989).

Figura 7 – Minério de Bauxita.



Fonte: ABAL (2017).

Segundo Aquino (2007), a bauxita ocorre geralmente em clima tropical ou subtropical com taxas de precipitação pluviométrica elevadas. O produto final consiste em uma rocha rica em óxido de alumínio, sendo sua composição mineralógica composta por três principais minerais: gibbsita  $\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$ , diásporo  $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$  e boehmita  $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ . A quantidade desses minerais presentes na rocha varia em função da localização onde é extraído o minério (CONSTANTINO *et al*, 2002).

De acordo com Arenare (2008) a bauxita, em termos de aplicação industrial, pode ser dividida em bauxita de grau metalúrgico e de grau não metalúrgico. A de grau metalúrgico é utilizada na produção de alumínio metálico, por possuir em sua composição maior quantidade dos minerais gibbsita e boehmita. Já a presença de diásporo em sua composição não é desejada em minérios de grau metalúrgico, devido a exigência de uma maior temperatura de

aplicação para ocorrer a solubilização do material. Neste caso a bauxita é classificada como de grau não metalúrgico e sua utilização é presente em outras áreas da indústria como refratários, cimentos, indústria química, entre outras. Tendo em vista a utilização da bauxita em diferentes áreas da indústria, a Tabela 1 mostra a proporção de minerais presentes que devem estar presentes na composição da mesma para que esta seja utilizada em cada um dos setores.

Tabela 1 – Proporção de minerais presentes na bauxita em diferentes áreas da indústria

Composição (%)	Metalúrgica	Refratária	Cimentos	Indústria Química	Abrasivos
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45 a 55	Mín. 85	45 a 55	40 a 60	80 a 88
SiO <sub>2</sub>	0 a 15	Máx. 11	Máx 6	5 a 18	Máx. 5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 a 30	Máx. 2,5	20 a 30	Máx. 4	2 a 5
TiO <sub>2</sub>	0 a 6	Máx. 3,5	2 a 4	0 a 6	2 a 5

Fonte: Adaptado Sampaio (2005).

Além dos minerais gibbsita, diásporo e boehmita, que classificam a bauxita quanto a sua aplicação industrial, a mesma possui também, outros constituintes em sua composição. Tais elementos são considerados como impurezas, podendo-se citar: minerais de argilas (principalmente caulinita), hematita, entre outros. Além disso, é encontrada uma significativa variedade de outros elementos como sódio, manganês, cálcio, fósforo, entre outros (LINS; LUZ, 2005). A presença dessas impurezas pode causar modificações na forma como se apresenta o minério, tornando-o um sólido com aspecto na cor de ferrugem para marrom ou até um de cor amarelada esbranquiçada, duro e cristalino. Sendo a cor e composição modificável conforme o local de extração (CONSTANTINO *et al*, 2002).

De acordo com Antunes (2012), maiores reservas mundiais de bauxita localizam-se em regiões tropicais e subtropicais, sendo os países como Austrália, China, Brasil, Guiné, entre outros, listados como os maiores produtores. A Tabela 2 mostra a relação de países com maiores reserva e produção de bauxita.

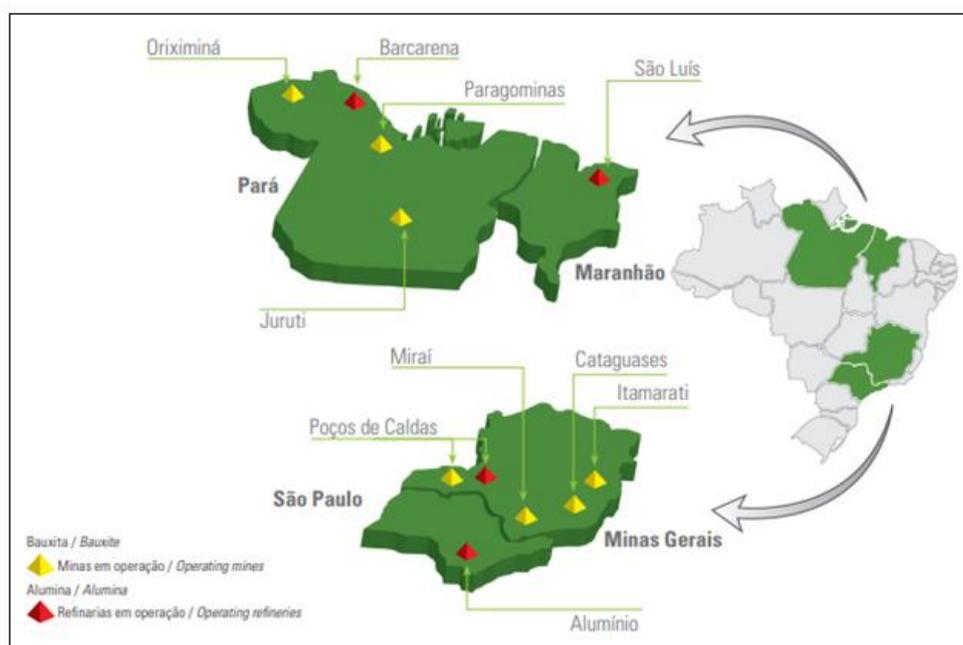
Tabela 2- Panorama global de maiores reservas e países produtores de bauxita.

Ranking	Reservas de Bauxita (Em milhões de toneladas)		Produção (Em mil toneladas)			
	Países	Volume	Bauxita	Volume	Alumina	Volume
1º	Guiné	7400	Austrália	81741	China	58979
2º	Austrália	6200	China	6500	Austrália	20097
3º	Brasil	2600	Brasil	37057	Brasil	10452
4º	Vietnã	2100	Guiné	27605	Índia	5000

Fonte: Adaptado ABAL (2017).

De acordo com IBRAM (2013), a produção mundial de bauxita em 2008, foi de 205 milhões de toneladas, sendo o Brasil, produtor de 13% desse valor (26,6 milhões de toneladas). Este fato faz com que o país esteja no ranking como o terceiro maior produtor de Minério de Bauxita. Em território brasileiro, o estado do Pará, é responsável por 85% de produção do país e Minas Gerais por 14%, sendo esses dois estados os principais produtores da matéria-prima. De acordo com a Figura 8 é possível observar a localização das refinarias e minas de bauxita, como também as principais empresas (Tabela 3) de mineração de bauxita atuantes em território brasileiro.

Figura 8 – Localização das minas e refinarias em operação no Brasil.



Fonte: ABAL (2017).

Tabela 3 – Principais empresas que atuam no setor de mineração de bauxita no Brasil.

Empresa	Volume - 2015 (Milhões tpa, base úmida)	%	Localização
MRN - Mineração Rio do Norte S.A	17,82	48	Trombetas (PA)
Mineração Paragominas S.A (Hydro)	10,06	27	Paragominas (PA)
Alcoa Alumínio S.A.	5,73	15	Juruti (PA) e Poços de Caldas (MG)
Compania Brasileira de Alumínio - CBA	2,12	6	Cataguases e Miraf (MG) - Encerrou Produção em 2015 (ITAMARATI,2015)
Outros	1,33	4	
Total	37,06	100	

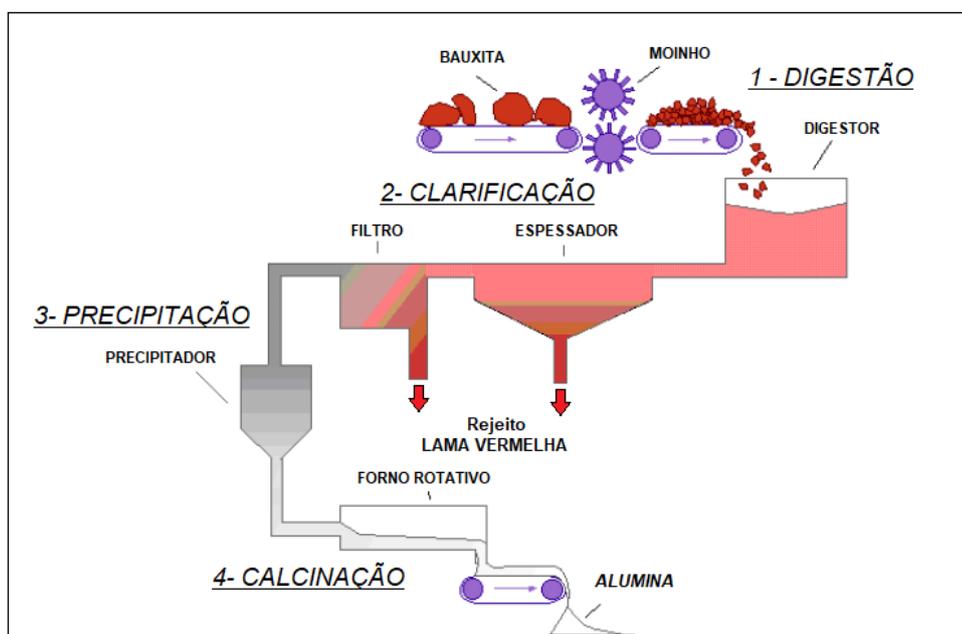
Fonte: Adaptado de ABAL (2017).

### 2.1.2. Produção

Para o refino de bauxita e produção de alumina, utiliza-se o método desenvolvido em 1888, pelo químico soviético Karl Josef Bayer, denominado de *Processo Bayer*. Esse processo alavancou o setor de metalurgia na época de sua concepção, sendo considerado no período o nascimento da extração de metais (HABASHI, 2005).

Bedin (2006) descreve, resumidamente, que a produção do alumínio se resume em duas etapas, sendo uma etapa a dissolução da alumina e a outra a separação dos resíduos insolúveis. A dissolução da alumina, presente na composição da bauxita, ocorre por ataque à alta temperatura, baixa pressão e por meio da utilização de soda cáustica concentrada. Já na etapa de separação dos resíduos insolúveis, a precipitação parcial da alumina ocorre em solução, através da diminuição da temperatura e diluição da lixívia de aluminato de sódio. Através da Figura 9 é possível se observar a exemplificação do processo Bayer.

Figura 9 – Exemplificação ilustrativa do processo de Bayer (refino da bauxita).



Fonte: Adaptado de Hind *et al* (1999).

O estágio inicial que é designado digestão, envolve primeiramente a moagem da bauxita pelo moinho, seguida pela digestão através do digestor. Nesta última etapa é adicionada uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), sob uma determinada temperatura e pressão.

Os valores e teores de concentração de hidróxido de sódio, temperatura e pressão utilizados no processo estão atrelados diretamente às características do mineral e variam conforme as propriedades da bauxita (BEDIN, 2010). Segundo Silva Filho et al (2007) é comum as produções modernas operarem em temperaturas em torno de 200 a 240 °C, e pressão em volta de 30 atm. Através da solução de hidróxido de sódio (NaOH), ocorre a formação de aluminato de sódio (NaAl(OH)<sub>4</sub>), como mostram as Equações 2.1 e 2.2.



Após a formação do aluminato de sódio (NaAl(OH)<sub>4</sub>), o mesmo é separado em duas frações: a fração grossa, que é calcinada, formando a alumina, que posteriormente, será utilizada na produção de alumínio; e, a fração fina, que é utilizada para formar novas soluções de aluminato de sódio (ANTUNES, 2012).

Segundo Sevryukov et al (1950) a fase de digestão, que consiste na lixiviação de bauxita com soda cáustica, dissolve grande parte da bauxita e da sílica presente na rocha. Segundo o autor, a sílica que contém caulinita e quartzo em sua composição pode ser denominada como sílica reativa, principalmente devido a reação entre a caulinita e a soda cáustica. Essa reação acaba formando vários outros compostos, que no final do processo resultam na perda da soda cáustica e de alumina, que são posteriormente descartadas na lama vermelha (rejeito de mineração da bauxita).

De acordo com Silva Filho (2007), após o processo de digestão, a “polpa” formada pelo processo é encaminhada para a segunda fase, a qual é considerada pelo autor uma das etapas mais importantes de todo o processo. Essa etapa, nomeada de clarificação, é onde ocorre a separação entre a fração sólida, denominada de resíduos insolúveis, da fração líquida, conhecida como licor. Kirk-Othmer (1978), afirma em termos mais sucintos que o material oriundo da digestão é submetido a lavagens com água limpa e pura com o objetivo de retirar a soda cáustica adicionada ao processo inicial e também os resíduos de lama vermelha presentes na mistura. Os procedimentos realizados durante a segunda fase são conhecidos como espessamento e filtração. O espessamento é um processo por onde a “polpa” proveniente da digestão é encaminhada à unidades conhecidas como espessadores. Essas unidades têm a função de aumentar o teor de sólidos na mistura, com o objetivo de adensá-lo, para a recuperação da maior quantidade possível de soda cáustica existente. Além disso, a adição de

polímeros é habitualmente utilizada para a indução da floculação das partículas (GÓIS ET AL., 2003). Após o fim do espessamento, o material resultante é submetido ao processo de filtração, o qual consiste no resfriamento da mistura e adição de pequenas partículas ou “cristais” de alumina. Com a adição desses pequenos “cristais”, a mistura é induzida à precipitação, que segundo Alcoa no Brasil (2008), a alumina contida na solução é precipitada em equipamentos denominados de precipitadores, através do processo chamado de cristalização por semente. De acordo com Hind et al (1999), o resultado final da clarificação consiste na formação de cristais de alumina e materiais residuais como resquícios de alumina e outros resíduos com presença de soda cáustica. Na sequência da clarificação, a alumina em cristais é levada ao processo posterior denominado calcinação e, os resquícios de partículas de alumina encaminhadas ao processo inicial (digestão).

Na etapa de calcinação o produto é lavado, secado e calcinado à temperaturas elevadas para que ocorra a desidratação dos cristais e como resultado, a obtenção de uma alumina sob a forma mais pura (SAMPAIO et al,2005).

Todo esse processo de beneficiamento de minério de bauxita acarreta na geração de resíduos ao longo de suas etapas de processamento. Bedin (2010) afirma que os resíduos insolúveis como óxidos de ferro, quartzo, carbonatos, entre outros que são formados durante a clarificação, são separados, gerando um rejeito denominado de lama vermelha (granulometria fina) e areia vermelha (granulometria arenosa), que são conhecidos como rejeitos de bauxita. A predominância de óxido de ferro na composição gera uma cor avermelhada ao rejeito, por isso a denominação de lama ou areia vermelha. Sua composição química varia amplamente e sua variação está relacionada ao tipo de natureza da bauxita e da técnica empregada no processo Bayer em cada estrutura de beneficiamento (ANJO; SILVA, 1983). De modo geral, os rejeitos possuem alta alcalinidade e suas partículas possuem pequena área superficial, ou seja, grande parte do rejeito é constituído por partículas finas (PRADHAN ET AL., 1996).

De acordo com Mcconchie et al (2002), é comum na composição da lama vermelha, a presença de uma grande quantidade de ferro, titânio e sílica, presentes inicialmente na bauxita, devido principalmente a retenção desses componentes no processo de beneficiamento. Além disso, devido à ineficiência da extração durante o refinamento do mineral, normalmente há, também, a presença de alumínio juntamente com sódio na composição. Além da presença de óxidos e outros tipos de elementos presentes na composição (PRADHAN ET AL., 1996). Através da Tabela 4 é possível observar a composição da lama vermelha apresentada por vários autores em diferentes países, onde ocorre o processo de beneficiamento da bauxita.

Tabela 4 – Composição da Lama Vermelha em distintos Países.

Referência	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	LOI <sup>(1)</sup>	País
WAO (2003)	30 – 60	10 – 20	3 – 50	2 – 8	Traço – 10	-	-	-	-	-
Ciccu et al., (2003)	30,45	17,91	9,58	12,06	8,61	0,86	7,77	0,30	12,38	-
Freitas (2003)	46,60	14,36	16,57	2,43	4,34	0,08	2,62	-		Brasil
Pan et al., (2003)	9,46	7,17	17,75	3,23	2,41	1,51	38,69	0,50	16,38	China
Genç et al., (2003)	34,05	25,45	17,06	2,74	4,90	1,86	3,69	-		Austrália
Park et al., (2002)	16,60	23,70	22,90	11,60	6,70	-	6,70	-	11,80	Coréia
Altundogan et al., (2002)	36,94	20,39	15,74	10,10	4,98	-	2,23	-	8,19	Turquia
Çengeloglu et al., (2001)	39,70 ±0,6 7	18,71 ±0,59	14,52 ±0,37	8,82± 0,96	4,90± 0,54	-	4,47± 0,56	-	8,15± 0,40.	Turquia
Yanik et al., (2001)	37,72	17,27	17,10	7,13	4,81	0,40	4,54	0,29	-	Turquia
Li (2001)	26,30	43,50	0,00	0,00	3,50	-	0,00	-	26,80	Jamaica
Li (2001)	52,60	19,10	1,00	0,40	9,00	-	4,10	-	13,80	Jamaica
Li (2001)	57,00	11,30	1,40	1,00	10,80	-	5,20	-	13,30	Jamaica
Li (2001)	54,40	4,10	2,00	1,10	9,40	-	23,1	-	5,90	Jamaica

Autor: Adaptado Silva Filho et al (2007).

Segundo a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), a classificação dos rejeitos de mineração de bauxita é considerada como Classe I, ou seja, perigoso, com alta corrosividade. Segundo Wang et al (2008) cada tonelada de alumina produzida resulta em uma ou duas toneladas de rejeitos, os quais serão dispostos em barragens projetadas especificamente para esse fim.

### 2.1.3. Armazenamento e Riscos Associados

A lama e areia vermelha oriundas do processo de produção do alumínio, no passado, como qualquer outro tipo de rejeito, eram descartadas diretamente no meio ambiente, principalmente em corpos hídricos como mares, lagos, rios, entre outros (WILLS, 1997). No entanto, ao longo do tempo foram desenvolvidas estruturas apropriadas para o recebimento desses rejeitos, levando-se em consideração consequências ambientais e a aplicação de legislações ambientais.

A barragem de rejeitos (Figura 10) é uma estrutura construída com o intuito de armazenar os resíduos oriundos do beneficiamento de minério, os quais não possuem valor comercial. Como os rejeitos possuem características nocivas ao meio ambiente, necessitam ser devidamente armazenados nesses locais, seguindo-se as prerrogativas da Lei número 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

As características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas dos rejeitos sofrem grande variação em função do tipo de minério extraído e do método de beneficiamento

empregado. Podem possuir granulometria mais grossa, se assemelhando às características de materiais granulares, como partículas do tamanho de areias, ou granulometria fina, como partículas do tamanho de argilas e siltes (ESPÓSITO, 2000).

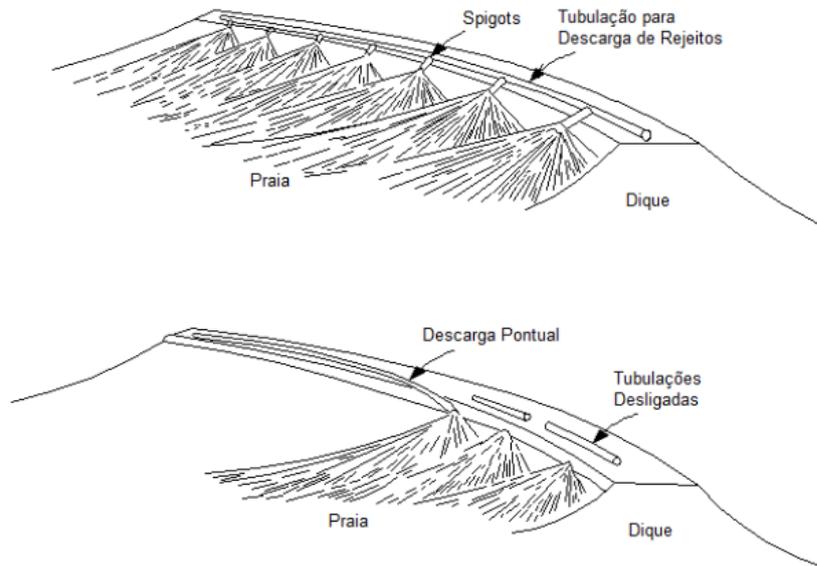
Figura 10 – Barragem de bauxita na área industrial da MRN dentro da floresta Nacional Saracá-Taquera (PA).



Fonte: Comissão Pró-índio de São Paulo (2013).

Os rejeitos oriundos do beneficiamento são diluídos em água de lavagem ou em substâncias químicas, utilizadas durante o processo. Posteriormente os rejeitos são levados até os reservatórios por *via úmida*, ou seja, são transportados em forma de polpa, sendo algumas vezes, por gravidade através de canais ou por meio de tubulações, com ou sem sistemas de bombeamento, dependendo das elevações relativas entre a planta de beneficiamento e o local onde será descartado (NIERWISKI, 2013). A disposição dos resíduos em uma praia de rejeitos pode ser efetuada em um ou em vários pontos de descarga (spigotting), como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Exemplo de formas de disposição dos rejeitos em barragens.



Fonte: Rafael (2012).

De acordo com Nierwinski (2013), o processo de deposição de rejeitos, através de alteamento de barragens, pode ocasionar sérios riscos ambientais se não possuir um projeto adequado de dimensionamento, caracterização e análise de comportamento do material que está sendo lançado.

As rupturas de barragens de rejeitos geralmente ocorrem onde um ou mais aspectos do projeto e construção/operação são deficientes. Muitas rupturas ocorreram como resultado de práticas operacionais que foram incompatíveis com os requerimentos de projeto, ou vice-versa (WAGENER et al. 1997 apud DUARTE, 2008). Além de aspectos citados anteriormente, segundo Tibana (1997) nos estudos realizados sobre acidentes recentes ocorridos nestes reservatórios, evidencia-se que uma das principais causas é a ocorrência de liquefação do material, como no desastre da Barragem de Fundão (MORGENTERN ET AL, 2016) (Figura 12).

Figura 12 – Foto aérea mostrando a devastação do distrito de Bento Rodrigues, Município de Mariana (MG).



Fonte: G1 (2017).

O evento de liquefação pode acontecer devido a redução da resistência de cisalhamento referente ao possível aumento da poropressão gerado no solo. Esse aumento pode estar vinculado a efeitos de vibrações (atividades sísmicas), como também pela aplicação de carregamentos estáticos (elevação do lençol freático e movimentos localizado de massa) (NIERVINSKI, 2013). A ocorrência do efeito de liquefação no material pode comprometer uma significativa parcela da estrutura de contenção dos reservatórios, ocasionando assim o rompimento dessas barragens (ROBERTSON, 2010). O Quadro 1 exemplifica alguns incidentes e acidentes ocorridos em barragens de rejeitos de mineração brasileiras e sua provável causa de acontecimento.

Quadro 1 – Incidentes e possíveis causas de rompimento de estruturas de barragens no Brasil.

Empresa	Local	Ano	Causa
Itaminas Comércio de Minérios S/A - Mina de Fernandinho	Itabirito - MG	1986	Verificou-se que o sistema de drenagem interno era bastante ineficiente, o que manteve o alto grau de saturação do material, contribuindo na geração de excessos de poropressão durante o lançamento de rejeitos, que culminou com a ruptura destas barragens por liquefação estática (RAFAEL,2012).
Mineração Rio Verde Ltda	Nova Lima - MG	2001	Relatado pelos grupos formados pela SEMAD, o acidente ocorreu após obras de alteamento, elevando o nível da barragem, houve excesso de água pelo descuido com a drenagem, com isso a estrutura liquefez, ocorrendo o rompimento (VASCONCELLOS;AZEEZ, 2018).
Industria Cataquases de Papel Ltda	Cataquases - MG	2003	O laudo técnico realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) aponta que o rompimento da barragem foi causado por erosão. Segundo o relatório, o acidente foi consequência de um processo gradual, que poderia ter sido evitado caso houvesse manutenção da estrutura. (CARVALHO, 2017).
Mineração Rio Pomba Ltda	Miraí - MG	2006	Devido a barragem da Fazenda São Francisco estar com seus níveis de armazenamento em sua máxima capacidade, as fortes chuvas registradas em janeiro de 2007 acabaram contribuindo para seu rompimento, totalizando cerca de 2 milhões de m <sup>3</sup> de lama de rejeito vazadas da estrutura (SÁ, 2007)
Herculano Mineração Ltda	Itabirito - MG	2014	Falha Técnica na operação da barragem por parte da mineradora (MINISTÉRIO PÚBLICO, 2014).
Samarco Mineração Ltda - Barragem Fundão	Mariana - MG	2015	A barragem entrou em colapso devido, provavelmente, à liquefação dos efluentes presentes, lançando na drenagem natural cerca de 42 de milhões de metros cúbicos de lamas oriundas do beneficiamento do minério de ferro que ocorre em usinas localizadas nas imediações (ANA, 2017).
Samarco Mineração Ltda - Barragem Germano	Mariana - MG	2015	Segundo Morgentern et al (2016) o laudo realizado sobre as causas afirmam três condições principais que permitiram que o acidente ocorresse, podendo-os citar: Liquefação do material do reservatório, deposição de limos em áreas não esperadas e problemas estruturais com um conduto de concreto que fez com que a barragem fosse elevada sobre os limos.
Samarco Mineração Ltda - Barragem Santarém	Mariana - MG	2015	Mesmas causas que a Barragem de Germano–(Mariana –MG) já citadas anteriormente.
Vale - Barragem Itabiruçu	Itabira - MG	2015	Erosões na poção superior do talude de jusante, comprometendo a segurança física da estrutura (ANA, 2017).
Vale - Mina Córrego do Feijão	Brumadinho - MG	2019	Laudo aponta problemas no sistema de Drenagem da Barragem (G1,2019). No entanto, ainda não há laudos que definam com precisão as causas do acidente.

Fonte: Autora(2019).

## 2.2. Melhoria De Solos

### 2.2.1. Conceitos Gerais

Segundo Tomasi (2018), o tratamento para melhoria de propriedades de um solo está diretamente relacionado com a escolha do tipo de agente incorporador, juntamente com a dosagem do mesmo. Tais fatores consistem em uma das etapas essenciais de decisões do projeto – senão a mais importante, devido a sua relação ao custo da solução de melhoria adotada.

Devido à diversidade dos locais, tipo de estabilizador e do método de dosagem, a interação química e física entre os agentes cimentantes e o solo não pode ser totalmente determinada, fazendo com que seja necessária a realização de estudos e testes em âmbito laboratorial (INGLES e METCALF, 1972).

Fundamentalmente, a seleção do agente estabilizante mais adequado para cada caso depende da natureza e das propriedades do solo natural, bem como das exigências de projeto referentes à estrutura que se pretende executar. Entretanto, é fundamental que a escolha do ligante seja pautada no custo-benefício e que garanta o menor impacto ambiental possível (TOMASI, 2018, p. 58).

Segundo Zampieri (2015) as misturas com agentes cimentantes ou agentes estabilizadores podem variar de acordo com o solo e estes agentes podem ser classificados em grupos, sendo o cimento e a cal classificados como aglomerantes.

Nesse contexto, o EuroSoilStab (2001) apresenta uma análise de diversos tipos de agentes incorporados a solos nórdicos, com o intuito de estabilização dos mesmos, tendo como base resultados de ensaios de resistência à compressão simples. A Figura 13 apresenta os resultados dessa pesquisa, sendo possível observar a classificação feita pelo autor da aplicabilidade de agentes cimentantes quando incorporados a um determinado tipo de solo nórdico baseado em resultados de amostras com 28 dias de cura. Em todas as composições avaliadas foram inseridos cimento e/ou cal, sozinhos ou combinados entre si e com gesso e escória. Observa-se que a eficácia da adição dos elementos cimentantes depende do tipo de solo que sendo tratado.

Figura 13 - Avaliação do efeito da aplicação de diferentes agentes cimentantes na estabilização de solos nórdicos.

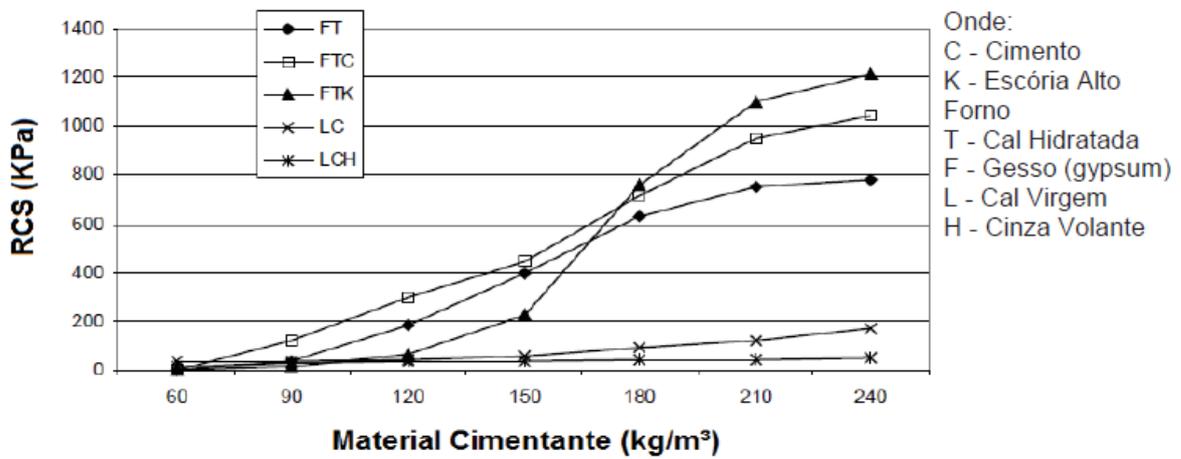
Agente Cimentante	Silte	Argila	Argila Orgânica	Turfa
	Matéria Orgânica 0 - 2 %	Matéria Orgânica 0 - 2 %	Matéria Orgânica 2 - 30 %	Matéria Orgânica 50 - 100%
Cimento	xx	x	x	xx
Cimento + Gesso	x	x	xx	xx
Cimento + Escória AF.	xx	xx	xx	xxx
Cal + Cimento	xx	xx	x	-
Cal + Gesso	xx	xx	xx	-
Cal + Escória	x	x	x	-
Cal + Gesso + Escória A	xx	xx	xx	-
Cal + Gesso + Cimento	xx	xx	xx	-
Cal	-	xx	-	-
Xxx	Muito Eficaz			
Xx	Boa Eficácia			
x	Média Eficácia			
-	Não indicado			

Fonte: EuroSoilStab (2001) apud Zampieri (2015).

A maioria dos estudos com solos com adição de agentes cimentantes, sendo o cimento o agente incorporado na mistura, demonstraram eficácia para a grande maioria dos solos. A resistência adquirida pela mistura ocorre rapidamente, sendo sua resistência máxima desenvolvida em um intervalo de tempo pequeno (MATEOS, 1961).

De acordo com EuroSoilstab (2001), o tipo de material cimentante, bem como, a quantidade de material adicionado pode variar o grau de ganho de resistência, por esse motivo a dosagem adequada em cada caso, deve ser devidamente estudada. Através da Figura 14 é possível observar exatamente essa variação do ganho de resistência em função da quantidade de agente cimentante adicionado a um solo. Neste caso, o estudo demonstra a variação de resistência (RCS) de uma turfa, com adição de diferentes agentes cimentantes em teores diversos. Na grande maioria dos casos analisados pelo autor, há a ocorrência significativa de aumento da resistência quando adicionado teores maiores do agente cimentante.

Figura 14 – Resistência à compressão simples em função do tipo e da quantidade de material cimentante numa turfa.



Fonte: EuroSoilStab (2001) apud Zampieri (2015).

### 2.2.2. Relação $\eta/Civ$

A maioria dos métodos tradicionais e estudos com misturas de solo-cimento demonstram a necessidade de uma quantidade relativamente moderada de testes laboratoriais para determinar a melhor dosagem de cimento para que a mistura possa atingir a resistência adequada de projeto (Rosa, 2010).

Foppa (2005) analisou a influência de variáveis na resistência mecânica de misturas de solo, quando adicionado cimento na composição. O intuito do estudo foi propor um método de dosagem, o qual relaciona os vazios existentes na amostra de solo-cimento e o teor volumétrico de agente cimentante. Segundo a bibliografia, Lanarch (1960) apresenta-se como o primeiro estudo encontrado que relaciona a quantidade de vazios com a quantidade de cimento, para estimar a resistência de solo com adição de cimento. Em sua pesquisa foi realizada uma análise de um solo composto por argila e areia, com porcentagens de cimento de 5,3%, 11,7%, 17,7% em relação à massa de solo correspondente. O autor utilizou diferentes teores de umidade e pesos específicos aparentes secos, sendo a relação de vazios da amostra e os teores de agente cimentante definida pela Equação 2.3.

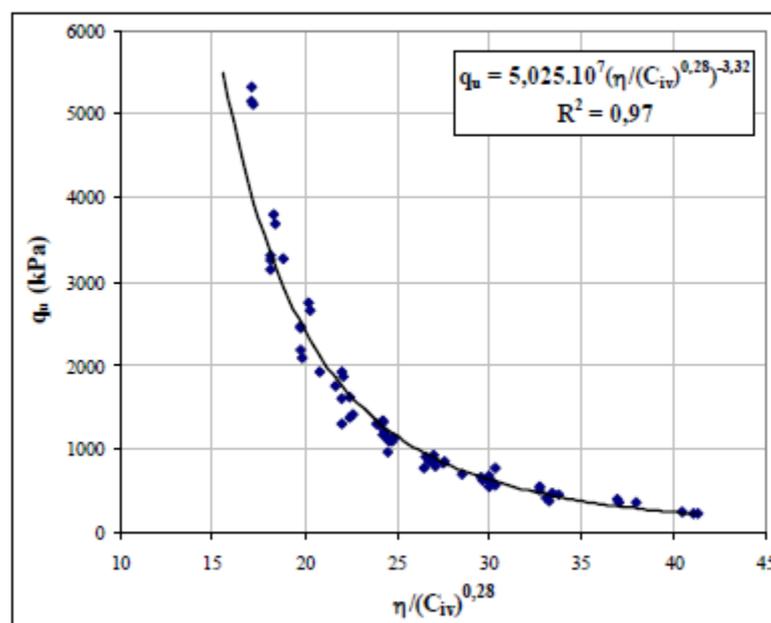
$$\frac{V_v \text{ (Volume absoluto de vazios - ar + água)}}{V_{ci} \text{ (Volume absoluto de cimento)}} = \frac{\frac{V_v}{V_{total}}}{\frac{V_{ci}}{V_{total}}} = \eta/Civ \quad \text{(Equação 2.3)}$$

Segundo Tomasi (2018), essa metodologia de dosagem (Equação 2.3) é baseada na relação entre a densidade das misturas (descrita como o  $\eta$  – *valor de porosidade*) e a quantidade de agente estabilizante (definida pelo  $C_{iv}$  – *teor volumétrico de agente cimentante*). A divisão entre os dois fatores ( $\eta/C_{iv}$ ) correlaciona a resistência mecânica aos níveis de vazios e cimentação do solo analisado. Cada vez mais a relação  $\eta/C_{iv}$  vem sendo minuciosamente estudada (Foppa, 2005, Consoli et al. 2010, entre outros) devido a resultados positivos para prever o comportamento mecânico de misturas de solos com agentes cimentantes, para diferentes tipos de materiais avaliados.

Foppa (2005) analisou a relação entre a resistência à compressão, o volume de vazios da amostra e volume de cimento. O autor constatou uma relação considerada substancialmente diferente entre essas grandezas. Com o intuito de compatibilizar as taxas de variações das grandezas citadas, foram aplicados testes de várias valores de potências sobre os parâmetros, sendo a potência de 0,28 resultando em um melhor ajuste para a relação vazios/cimento.

A Figura 15 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão simples obtidos por Foppa (2005) quando aplicado o método proposto por Lanarch (1960) já com o expoente de ajuste de 0,28. Os resultados foram realizados com amostras de um solo arenoso e cimento quando as mesmas atingiram sua cura de 7 dias corridos.

Figura 15 – Relação de vazios/cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) versus resistência a compressão simples ( $q_u$ ) pelo método proposto por Lanarch (1960).



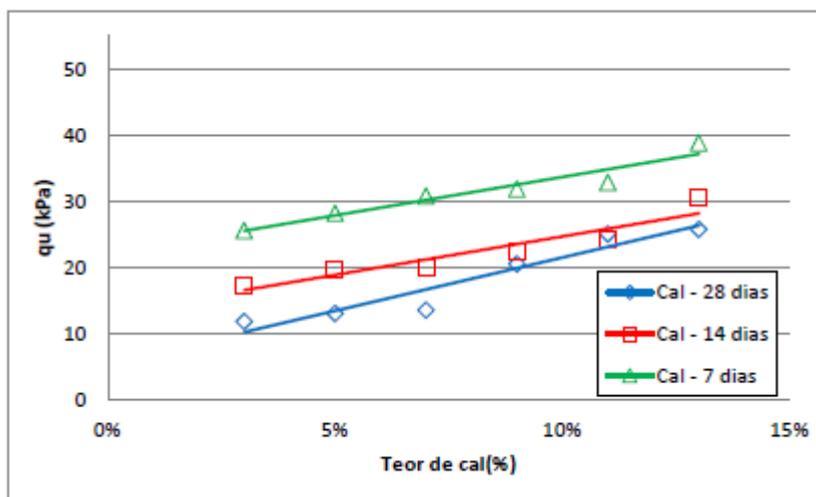
Fonte: Foppa (2005).

Foppa (2005) adverte em seu estudo sobre o método proposto por Lanarch (2005), que a relação vazios/cimento estabelecida é válida quando se é considerado como constante, o teor de umidade da etapa de moldagem. Além disso, o autor em seu estudo afirma que a resistência à compressão simples aumenta exponencialmente com a redução da porosidade da mistura. E através da curva de dosagem o projetista pode determinar quanto de cimento e energia de compactação deve-se utilizar para alcançar a resistência desejada. Sendo de grande importância a utilização desse parâmetro,  $\eta/C_{iv}$ , por exemplo, para o controle de compactação em campo de um solo tratado, pois quando a compactação se torna deficitária, é possível obter-se, através da curva do material, a quantidade de cimento faltante para que uma determinada resistência seja obtida.

### 2.2.3. Resistência à Compressão

Para se estudar o comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados, a resistência à compressão do material apresenta-se como um requisito essencial para a compreensão e comparação entre diferentes agentes cimentantes disponíveis para o uso na prática (FLOSS, 2012). Tebechrani (2017) realizou ensaios de resistência à compressão simples com amostras de um solo orgânico com inserção de diferentes porcentagens de cal na composição. Foram definidos seis teores de cal (3%, 5%, 7%, 9%, 11% e 13%), conforme mostra os resultados na Figura 16 e avaliadas a resistência do material em função do teor de cal inserido e tempo de cura. Independentemente do tempo de cura, é possível observar que para as três análises realizadas, o aumento de teor de cal gerou um aumento da resistência das amostras ( $q_u$ ).

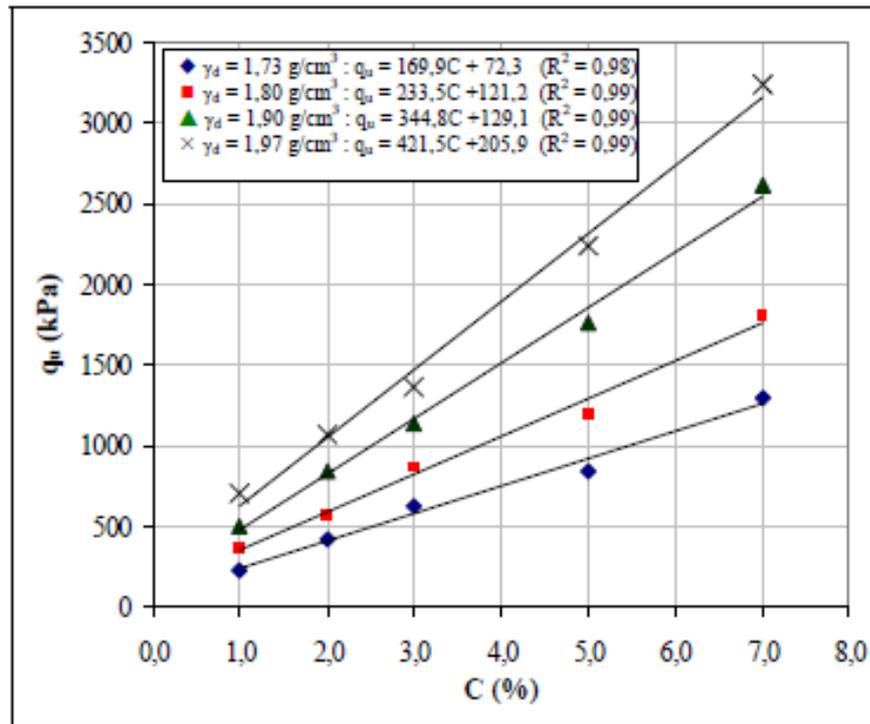
Figura 16 – Relação entre o teor de cal empregado nas amostras e a resistência à compressão simples.



Fonte: Tebechrani (2017).

Segundo Foppa (2005), a resistência à compressão simples aumenta linearmente conforme a quantidade de agente cimentante adicionada, no entanto, a taxa de crescimento depende de variáveis diferentes para cada tipo de solo analisado. Em seu estudo, o autor analisou o comportamento da resistência à compressão de um solo arenoso artificialmente cimentado, quando modificado a porcentagem de cimento inserido. Foram definidos quatro pesos específicos aparentes secos ( $1,73 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,80 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,90 \text{ g/cm}^3$  e  $1,97 \text{ g/cm}^3$ ) e cinco teores de cimento (1%, 2%, 3%, 5% e 7%). Conforme apresenta a Figura 17, pode-se observar pelos resultados o evidente aumento da resistência do material ( $q_u$ ) conforme ocorre o aumento do teor de cimento (C%).

Figura 17 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento adicionado.

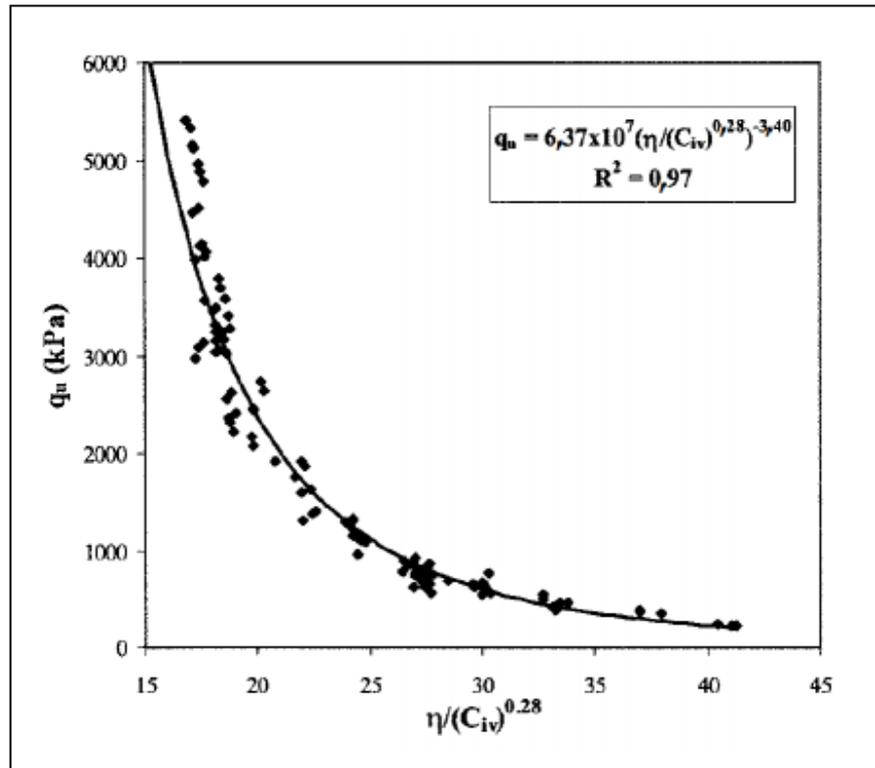


Fonte: Foppa (2005).

Prietto (1996) afirma que a resistência à compressão simples está diretamente relacionada à porcentagem de agente cimentante adicionada. No entanto, o autor afirma que esta porcentagem não seria a única variável de influência da resistência, podendo-se citar o fator densidade, que de acordo com o autor, em solos mais densos as partículas possuem maiores áreas de contato entre si, ocasionando assim, uma melhor cimentação das partículas.

Além da influência direta da densidade e da quantidade do agente cimentante incorporado, Consoli et al (2007) avaliaram para um solo originário do Arenito Botucatu, a relação da resistência à compressão do material em função da porosidade da mistura e do teor volumétrico de cimento adicionado ( $\eta/Civ$ ), conforme discutido no item 2.2.2 deste trabalho. Nestas condições, como apresentado no item 2.2.2 deste trabalho, a resistência à compressão varia exponencialmente em função da relação ( $\eta/Civ$ ), e, portanto, os autores indicaram que a porosidade é diretamente proporcional à resistência à compressão, enquanto o teor volumétrico inversamente proporcional como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Variação da resistência à compressão com relação vazios/cimento.



Fonte: Consoli et al (2017).

#### 2.2.4. Durabilidade

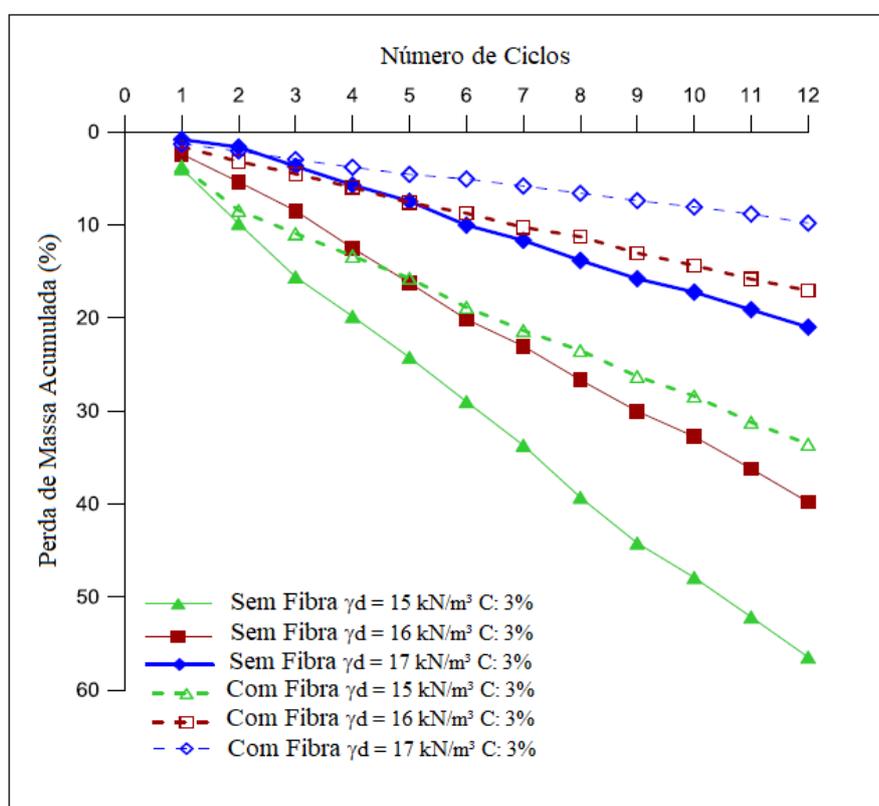
Durabilidade é capacidade do material de manter sua integridade estrutural nas condições às quais é exposto (MARCON 1977, apud KANAZAWA, 2015).

Winter (2018) afirma que a prática de utilização de solos com inserção de agente cimentante, necessita cada vez mais que esses materiais sejam duráveis e não percam suas propriedades ao longo de sua vida útil. Além do mais, afirma que a durabilidade do material depende de diversos fatores, entre eles a porcentagem e qualidade do agente cimentante, a quantidade do material amorfo e o índice de vazios na mistura.

Consoli et al (2017) executaram ensaios de durabilidade de misturas de rejeito de mineração de ouro com inserção de cimento e fibras em sua composição. O objetivo da pesquisa era avaliar a resposta do material do rejeito de ouro “melhorado” artificialmente, em relação às interpéries do meio ao qual iria ser submetido. Os autores primeiramente em seu estudo definiram três valores de peso específico aparente seco a serem trabalhados no material: 15 kN/m<sup>3</sup>, 16 kN/m<sup>3</sup> e 17kN/m<sup>3</sup> e apenas um valor de teor de cimento de 3%. Com esses três valores de densidade definidos, foi avaliado o comportamento de duas misturas, a

primeira apenas com rejeito de ouro e cimento e a segunda de rejeito de ouro com adição de cimento e fibras. As duas misturas foram submetidas a ciclos de molhagem, secagem e escovação, e com isso, avaliadas as porcentagens de massa perdida acumulada ao longo de todas essas etapas. Como é possível observar na Figura 19, Consoli et al (2017) afirmam que conforme o aumento do peso específico aparente seco da mistura, maior é a durabilidade do material, sendo os resultados mais eficazes nas amostras que tiveram a inserção de fibras juntamente com o cimento.

Figura 19 – Perda de massa acumulada em função do número de ciclosem rejeito de mineração de ouro tratado com cimento e fibra com variação da densidade do material.

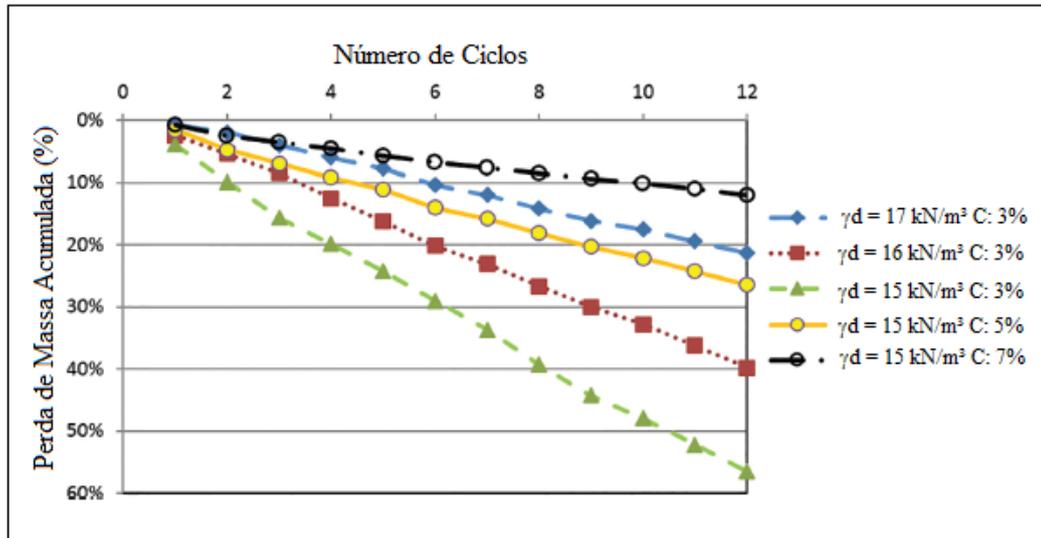


Fonte: Consoli et al (2017).

Um segundo estudo realizado por Consoli et al (2018), avaliou da mesma maneira a resposta da durabilidade de misturas, só que dessa vez apenas em composições de rejeito de mineração de ouro com inserção de cimento. Nesta pesquisa, os autores utilizaram pesos específicos aparentes secos de 15 kN/m<sup>3</sup>, 16 kN/m<sup>3</sup> e 17kN/m<sup>3</sup> para três porcentagens de cimento diferentes: 3%, 5% e 7%. Os resultados obtidos pelo estudo, como mostrado na Figura 20, confirmam o evidente aumento da durabilidade do material quando aumentado

tanto o valor do peso específico aparente seco do material, bem como a porcentagem de cimento inserida.

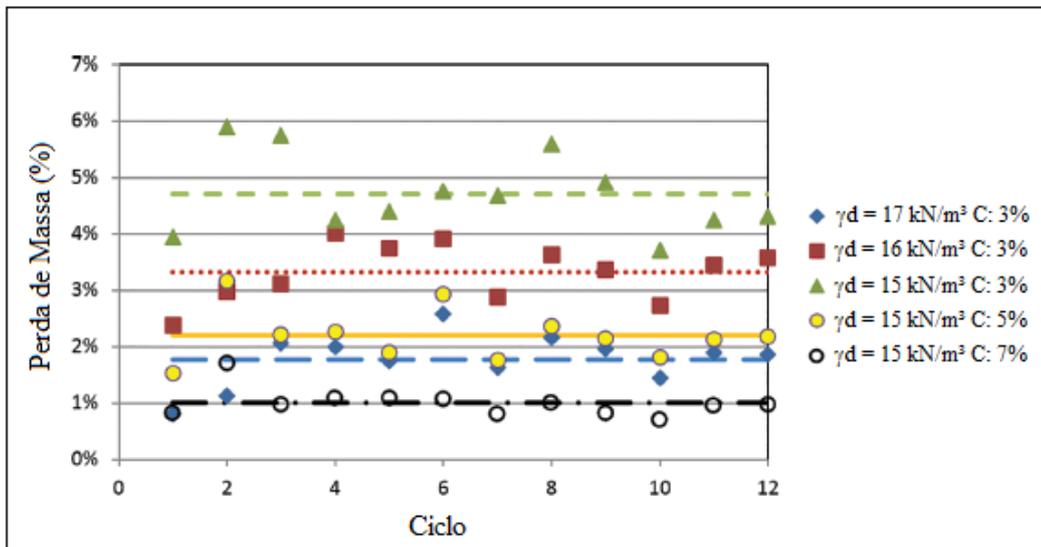
Figura 20 – Perda de massa acumulada em função do número de ciclos. em rejeito de mineração de ouro tratado com diferentes teores de cimento e diferentes pesos específicos aparente seco.



Fonte: Adaptado de Consoli et al (2018).

Além disso, os autores avaliaram as perdas de massa isoladas para cada ciclo, como mostra a Figura 21 e concluíram que a perda de massa unitária por ciclo é reduzida conforme o aumento também do peso específico aparente seco e do teor de cimento incorporado.

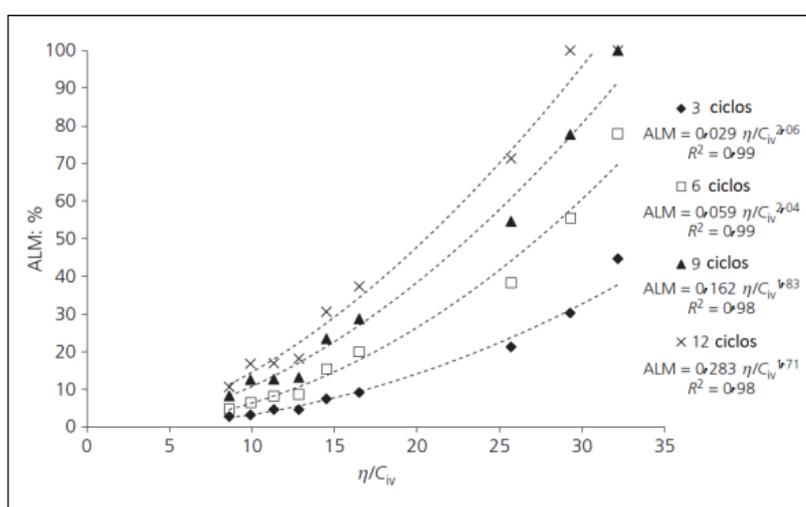
Figura 21 – Perda de massa em função do ciclo.



Fonte: Adaptado de Consoli et al (2018).

Um outro estudo realizado por Consoli e Tomasi (2017), no entanto, para a avaliação de uma areia de Osório cimentada artificialmente, correlacionou, também, através dos ensaios de durabilidade, a perda de massa acumulada em função do fator porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}$ ). Através da Figura 22, é possível observar a clara correlação entre a perda de massa acumulada e o fator  $\eta/C_{iv}$  em função do ciclo de ensaio analisado. Pode-se observar que o aumento da porcentagem de Perda de Massa Acumulada (ALM) é diretamente proporcional ao aumento da porosidade ( $\eta$ ) e inversamente proporcional ao aumento do teor de cimento ( $C_{iv}$ ).

Figura 22– Relação entre a perda de massa acumulada (ALM) e a porosidade/teor volumétrico de cimento.



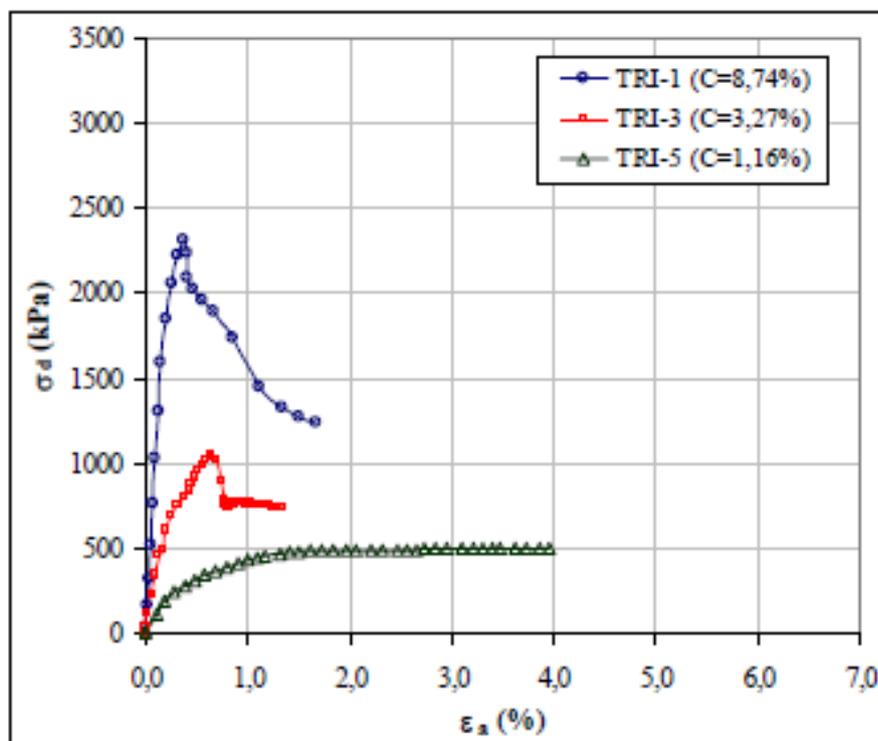
Fonte: Consoli e Tomasi (2017).

### 2.2.5. Tensão e Deformação

Segundo Floss (2012) o parâmetro de resistência à compressão não é o único critério para compreensão do comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados, podendo-se, também, realizar a avaliação de dados de deformação e rigidez do solo.

Foppa (2005) em seu estudo avaliou além das características de resistência à compressão de um solo arenoso cimentado, a relação entre tensão e deformação das amostras. O autor avaliou para um mesmo peso específico aparente seco, três teores de cimento distintos (1,16%, 3,27% e 8,74 %), como mostra a Figura 23. Os resultados obtidos na pesquisa relatam que houve aumento da resistência de pico e da rigidez conforme ocorreu o aumento da porcentagem de cimento.

Figura 23 – Curva tensão-deformação dos corpos-de-prova com  $\gamma_d = 1,73 \text{ g/cm}^3$ .



Fonte: Foppa (2005).

## 2.3. Caracterização Geotécnica

A caracterização básica consiste numa etapa importante da área de Mecânica dos Solos para estudos geotécnicos. Através de ensaios como análise granulométrica, Limites de Plasticidade (LP) e Liquidez (LL), Compactação (umidade ótima), densidade real dos grãos, entre outros é possível obter parâmetros e características do material estudado.

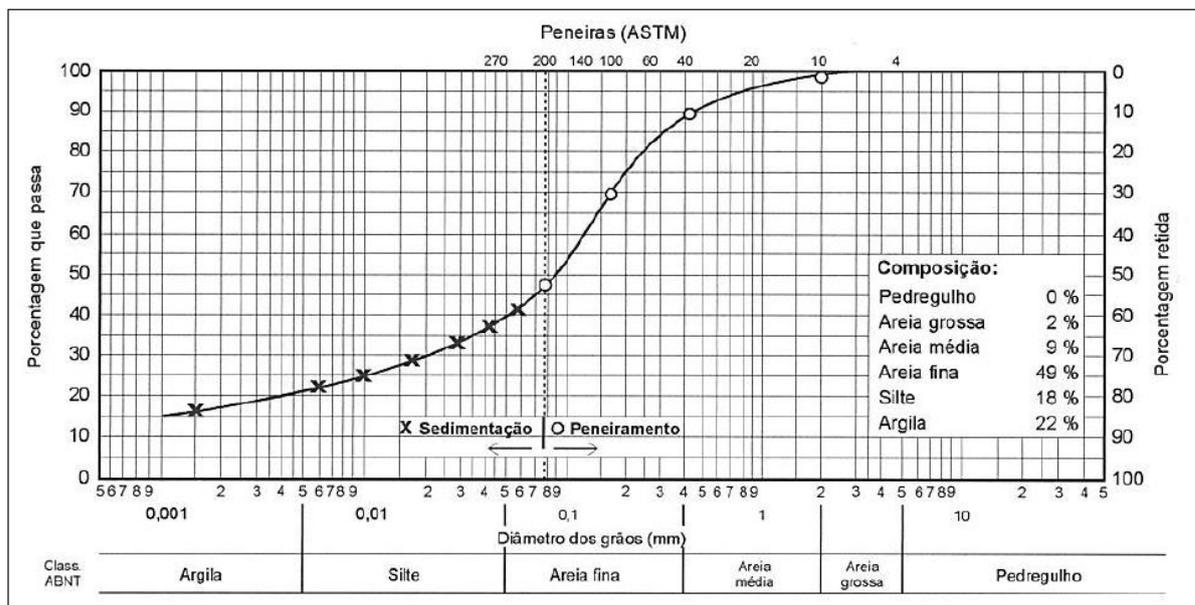
### 2.3.1. Análise Granulométrica

O ensaio de análise granulométrica é utilizado na obtenção da distribuição granulométrica do solo, ou seja, através do ensaio é possível determinar a porcentagem em peso que cada faixa de tamanho de grãos representa na massa seca total de amostra. O método consiste na combinação das análises por sedimentação e por peneiramento.

De acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016) o ensaio de análise granulométrica pode ser dividido de acordo com o tipo e tamanho das partículas do solo, sendo os solos grossos (areais e pedregulhos), os quais possuem pouco ou quase nenhum resíduo de finos, a obtenção da curva granulométrica é elaborada através do ensaio de peneiramento. Já para os

solos que possuem uma grande quantidade de finos (argilas e siltes), o ensaio de sedimentação seria mais indicado para obtenção da sua curva granulométrica. Para o reconhecimento dos tamanhos dos grãos, de acordo com Pinto (2006), o peso do material que passa em cada peneira, referido ao peso seco da amostra, é considerado como a “porcentagem que passa” e, pode ser representado graficamente, em escala logarítmica, em função da abertura da peneira, como mostra a Figura 24. No entanto, a granulometria por peneiramento se limita a alguns diâmetros, devido à menor peneira apresentar uma abertura de 0,075 mm. Sendo assim, torna-se necessária a realização de ensaio de sedimentação para avaliação da distribuição de partículas menores (finos).

Figura 24 – Exemplo de Curva de distribuição granulométrica do solo.



Fonte: Pinto (2006).

O processo de sedimentação pode ser definido como a separação dos sólidos em suspensão em um fluido, utilizando-se da força gravitacional, o que resulta num conteúdo, onde, em sua parte inferior ficam depositados os sólidos e na parte superior da solução um líquido “limpo”. A técnica se baseia na Lei de Stokes: a velocidade de queda das partículas ( $v$ ) esféricas num fluido atinge um valor limite, que depende do peso específico do material da esfera ( $\gamma_s$ ), do peso específico do fluido ( $\gamma_w$ ), da viscosidade do fluido ( $\mu$ ), e do diâmetro da esfera ( $D$ ), conforme a Equação 2.4 (PINTO, C. S. 2006):

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w \cdot D^2}{18 \cdot \mu} \quad (\text{Equação 2.4})$$

De acordo com a Equação 2.4 as partículas do solo cairão com velocidades diretamente proporcionais ao quadrado de seus diâmetros. Em uma suspensão genérica colocada em repouso, a densidade inicial do sistema é equivalente ao longo de toda a sua profundidade. No decorrer do ensaio, quando as partículas maiores vão se depositando no fundo, a densidade na parte superior diminui. As densidades de suspensão são obtidas através do uso de um densímetro, utilizado na realização de leituras em vários intervalos de tempo, para a obtenção da curva granulométrica.

De acordo com Pinto (2006), a operação mais importante da sedimentação é a separação completa das partículas, com o intuito de sedimentá-las isoladamente. Na sua composição natural, é comum que as partículas estejam agregadas ou em flocos, sendo necessária sua total desagregação, pois a falta de separação na mistura implicará na determinação dos diâmetros dos flocos e não necessariamente das partículas isoladamente. Por esse motivo, no ensaio de sedimentação, adiciona-se à amostra analisada, um produto químico com ação defloculante, devido justamente a esse efeito de floculação ou formação de grumos do material e, deixa-se em repouso, por um período mínimo de 12 horas.

De acordo com Ortega et al (1997), a floculação consiste numa reação das partículas devido às forças de Van der Waals, originadas a partir de dipolos atômicos e moleculares existentes no material, as quais apresentam sempre caráter atrativo, o que origina a formação de “grumos” ou “flocos” do material. A presença desses aglomerados ou “flocos” em suspensões de partículas na mistura, leva à necessidade de utilização do defloculante, para o rompimento dos aglomerados e com isso, a diminuição da viscosidade até o ponto de existir somente as partículas individualizadas. Sousa Pinto (2006) afirma que o uso ou não de defloculante num ensaio de sedimentação resulta em diferenças significativas em seu efeito final.

Além da interferência do defloculante em ensaios de sedimentação, a caracterização geotécnica de um solo também pode sofrer em conjunto, variações nos resultados devido ao uso ou não desse líquido desagregador. Resultados de ensaios de granulometria com e sem o uso de defloculante podem fornecer classificações distintas de acordo com os sistemas rotineiramente utilizados: SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) e TRB (Transportation Research Board). (NIERWINSKI;MARTINS;SCHNAID, 2018, p. 4).

Com a definição dos diâmetros das partículas que constituem o sol, a NBR 6502 (ABNT, 1995), possibilita que os mesmos sejam classificados de acordo com o tamanho dos grãos predominantes conforme faixa de variação como é possível observar na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação de solos de acordo com faixas de tamanho de grãos.

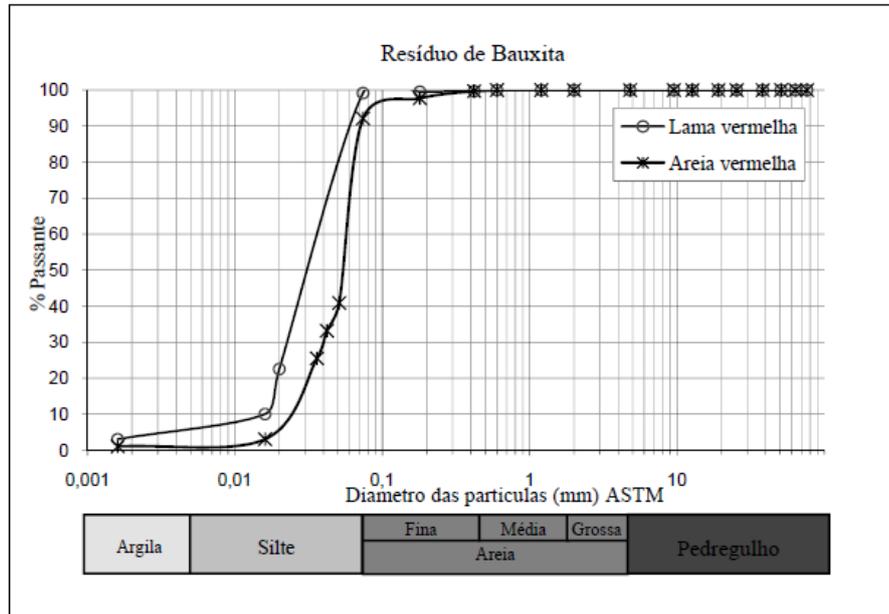
<b>Classificação</b>	<b>Diâmetro dos Grãos (mm)</b>
Bloco de Rocha	$d > 1000$
Matação	$200 > d > 1000$
Seixo	$60 > d > 200$
Grânulo	$2 > d > 60$
Areia Grossa	$0,6 > d > 2$
Areia Média	$0,2 > d > 0,6$
Areia Fina	$0,06 > d > 0,2$
Silte	$0,002 > d > 0,06$
Argila	$d < 0,002$

Fonte: Adaptado da NBR 6502/95.

Para o caso dos rejeitos de mineração, segundo Nierwinski (2013) sua granulometria é considerada um parâmetro de difícil determinação, devido a influência das variáveis como: origem da rocha, método de extração e tipo de beneficiamento. Além disso, Bedin (2010) afirma que alterações granulométricas podem ser afetadas também pela variação das partículas do minério lavrado, principalmente no processo de sedimentação. Em geral, a autora afirma que os rejeitos de mineração não apresentam uma granulometria definida, apresentando partículas com o tamanho variando entre argilas e areias (Tabela 5). Vick (1983) destaca que a granulometria dos rejeitos de mineração está predominantemente na faixa característica de partículas do tamanho de siltes, ocorrendo a presença de resquícios de partículas do tamanho de areia, embora sempre com predominância de partículas mais finas.

Bedin (2010) em seu estudo, realizou a análise granulométrica de rejeitos de bauxita, sendo o rejeito dividido entre lama vermelha e areia vermelha. Como mostra a Figura 25, a autora afirma que a areia vermelha é caracterizada sob o aspecto de tamanho de partículas predominantes, como silte arenoso e, a lama vermelha em silte argiloso.

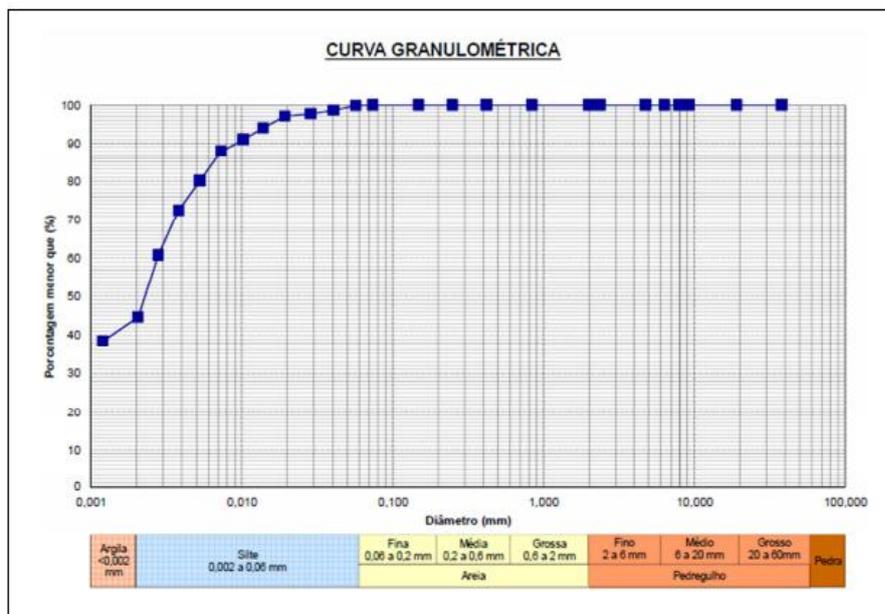
Figura 25 – Curva granulométrica de rejeito de bauxita.



Fonte: Bedin (2010).

Nierwinski (2013) apresenta em seu estudo, mais um resultado de curva granulométrica de um rejeito de mineração de bauxita, que segundo a autora, pode ser classificado, no aspecto de tamanho de partículas, como um silte argiloso como é apresentado na Figura 26.

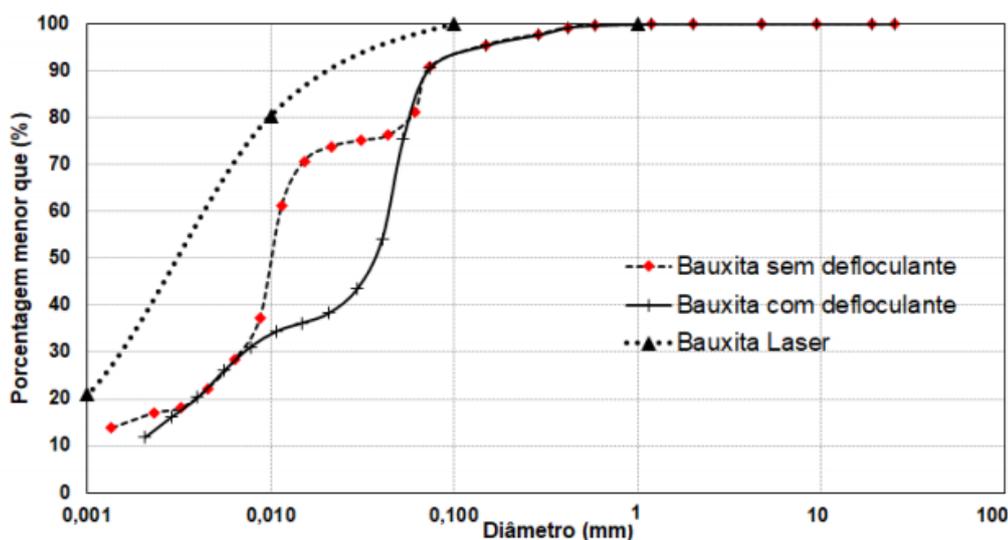
Figura 26– Curva granulométrica do rejeito de mineração de bauxita.



Fonte: Nierwinski (2013).

Um estudo referente ao ensaio de sedimentação, em rejeitos de mineração de bauxita, foi realizado por Nierwinski et al (2018). A Figura 27 apresenta as curvas granulométricas definidas pelo método de sedimentação, com e sem o uso de defloculante e a pela metodologia à laser. Percebe-se que ocorre uma disparidade acentuada entre as curvas. Segundo Nierwinski et al (2018) a curva obtida sem o uso do defloculante apresenta um comportamento descontínuo e apresenta alterações relevantes, especialmente para partículas extremamente finas. Os autores ainda complementam que entre curvas obtidas por sedimentação e a laser ocorre uma disparidade, comportamento este, que os autores acreditam ser desencadeado por uma possível interação entre elementos químicos presentes no rejeito de bauxita e a água do ensaio de sedimentação.

Figura 27 - Curvas granulométricas obtidas com e sem o uso de defloculante em amostras de minério de Bauxita.



Fonte: NIERWINSKI; MARTINS; SCHNAID (2018).

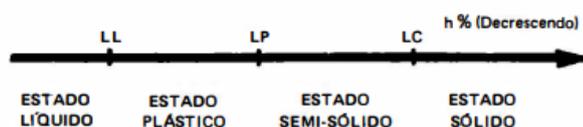
### 2.3.2. Plasticidade e Limites de Attenberg (LL e LP)

Devido a alguns solos apresentarem uma porcentagem elevada de “finos”, o ensaio de análise granulométrica torna-se, muitas vezes insuficiente para a caracterização adequada do material, sendo necessária uma avaliação conjunta das propriedades de plasticidade da amostra.

A plasticidade pode ser definida como uma propriedade dos solos, referente à maior ou menor capacidade deles serem moldados, em condições de umidade definida, sem que ocorra variação de volume da amostra analisada. É considerada uma das mais importantes propriedades das argilas (CAPUTO, 1988).

Sendo a umidade de um solo muito elevada, ele se apresenta como um fluido denso e se diz estar no estado líquido. À medida que evapora a água, ele endurece e, para um certo teor de umidade, perde sua capacidade de fluir, porém pode ser moldado facilmente e conservar sua forma. O solo encontra-se, assim, no estado plástico. A continuar a perda de umidade, o estado plástico desaparece até a umidade ser igual ao limite de plasticidade (LP) e o solo se desmancha ao ser trabalhado. Este é o estado semi-sólido. Continuando a secagem, ocorre a passagem gradual para o estado sólido. O limite entre os dois estados é um teor de umidade igual ao limite de contração (LC) como mostra a Figura 28 (CAPUTO, 1988).

Figura 28 – Ilustração dos estados físicos ou estados de consistência.



Fonte: Caputo (1988).

Os limites existentes a serem determinados podem ser citados como Limites de Atterberg (LL e LP), devido a descoberta pelo cientista Albert Atterberg, no ano de 1911. O ensaio para obtenção do Limite de Liquidez (LL) pode ser realizado através do aparelho de Casagrande (Figura 29). O processo consiste na adição de água ao solo, até a obtenção de uma “pasta” homogênea. Em seguida este material é colocado na concha do aparelho de Casagrande imprimindo-se à mesma, quedas de altura de 1 (um) cm e intensidade constante, anotando-se a quantidade necessária para se fechar o “sulco” realizado na amostra. Este sulco consiste em uma abertura ou “rachadura” central feita no solo disposto na concha do equipamento, com o auxílio de um cinzel. Para a realização do ensaio, gira-se a manivela do equipamento na velocidade de 2 revoluções por segundo, contando-se o número de golpes da calota, necessários para obter-se um fechamento da ranhura de 1 cm entre as paredes inferiores. O processo é repetido pelo menos três vezes.

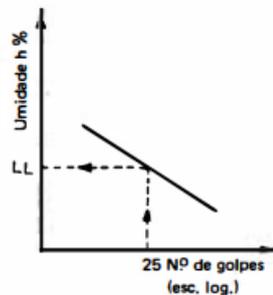
Figura 29 – Aparelho Casagrande.



Fonte: Caputo (1988)

Os resultados obtidos no ensaio devem ser plotados num gráfico semi-logarítmico, com o número de golpes no eixo x e os teores de umidade correspondentes no eixo y. Realizando-se uma aproximação da distribuição dos pontos no gráfico (Figura 30), por meio de uma reta, determina-se o valor de LL. O limite de liquidez (LL) corresponde ao teor de umidade correspondente a 25 golpes.

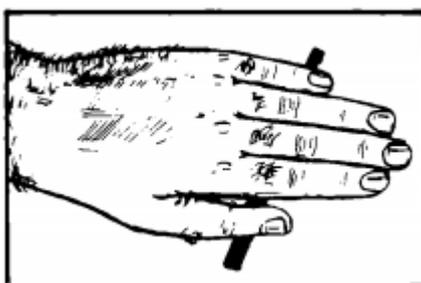
Figura 30 – Determinação do valor do Limite de Liquidez.



Fonte: Caputo (1988).

Já limite de plasticidade (LP) é determinado como sendo o teor de umidade, para o qual o solo começa a se fraturar quando se tenta moldar com ele, um cilindro (Figura 31) de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento (CAPUTO, 1988).

Figura 31 – Ilustração da elaboração do ensaio de avaliação do Limite de Plasticidade do material.



Fonte: Caputo (1988).

Bedin (2010) realizou ensaios para averiguar o comportamento de plasticidade do material através da análise dos Limites de Atterberg de amostras de rejeito de bauxita. A autora afirma que os rejeitos de bauxita apresentam média à alta plasticidade, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Distribuição granulométrica e variação dos índices físicos.

Material	Posição	$\gamma_{mat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL	LP	IP
Areia vermelha	Superfície	17,8	1,6	1	91	8	30,8	25,7	5,1
	Profundidade	16,5	1,9						
Lama vermelha	Superfície	15,8	2,4	7	93	0	38,9	24,9	14
	Profundidade	17	1,7						

Fonte: Adaptado de Bedin 2010.

Outro estudo com rejeito de bauxita foi apresentado por Nierwinski (2013). Neste estudo foram avaliadas as propriedades de um rejeito em diversos pontos de profundidades de um depósito localizado no Estado do Maranhão. A Tabela 7 apresenta alguns dos resultados obtidos neste estudo.

Tabela 7 – Resumo dos resultados dos ensaios de laboratório realizados com rejeito de mineração de bauxita.

Amostra	Prof. (m)	LL	LP	IP	$\rho_s$	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
3R-01	5,70 – 6,30	53,1	39,9	13,1	2,94	0,0	49,2	50,8
	11,70 – 12,30	42,3	35,2	7,1	2,78	0,0	82,3	17,7
3R-02	6,70 – 7,30	51,1	34,9	16,2	2,90	0,4	51,5	48,1
	12,70 – 13,30	46,4	30,0	16,4	2,88	5,0	63,0	32,0
3R-03	5,70 – 6,30	45,1	36,9	8,2	2,89	1,8	62,9	35,3
	9,70 – 10,30	52,1	41,0	11,0	2,80	0,3	72,3	27,4
3R-04	1,70 – 2,30	33,7	25,8	7,8	2,96	17,0	76,0	6,0
	5,70 – 6,30	41,1	36,2	4,9	2,97	7,6	49,1	43,3
3R-05	4,70 – 5,30	49,3	34,0	15,3	2,91	0,1	55,7	44,3
	8,70 – 9,30	35,2	34,2	1,0	3,02	5,5	68,0	26,5
3R-06	3,70 – 4,30	49,8	32,4	17,3	2,72	18,5	49,6	31,9
	7,70 – 8,30	48,4	36,1	12,3	3,09	1,3	64,6	34,1

Fonte: Adaptado de Nierwinski (2013).

### 2.3.3. Compactação

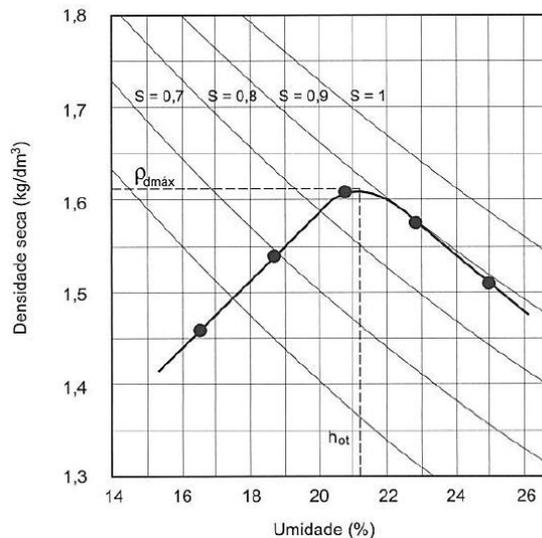
A compactação é um dos vários métodos utilizados para melhoramento das propriedades mecânicas de um solo. É definido como um método mecânico, baseado na expulsão de ar dos poros do solo, reduzindo o índice de vazios, sob umidade constante. Tem como objetivo básico a obtenção de um novo material, pois a compactação gera deformações permanentes que modificam as propriedades originais do solo, e este novo material deve apresentar um comportamento adequado para a aplicação a que se destina (BAPTISTA, 1976 apud WERK, 2000)

Em 1933, Proctor observou que a densidade atingida na operação de compactação, ou seja, com o emprego de uma energia de compactação, depende da umidade do solo na hora do procedimento (WERK, 2000). Com isso, teve início os estudos em técnicas de compactação, para que se determinasse a umidade mais adequada para obtenção da máxima densidade, quando aplicado uma determinada energia.

Segundo Werk (2000), para se determinar um teor de umidade ótimo, para o qual obtém-se a densidade máxima aparente, utiliza-se uma quantidade certa de massa de solo seco. Com o aumento do teor de umidade na massa de solo, ocorre a lubrificação das partículas, permitindo maior aproximação entre elas, e com isso, diminuição do volume do

solo durante a compactação e, em decorrência disso, o aumento da densidade máxima do solo até um limite máximo. Ao continuar a umedecer a amostra, a água introduzida pelo umedecimento expulsa o ar existente nos poros, preenchendo-os, impedindo a aproximação das partículas, reduzindo seu volume e com isso, diminuindo a densidade. Os pares de pontos (teor de umidade e densidade) plotados em um gráfico originam a denominada curva de compactação (Figura 32), sendo que esta é característica de cada material. Para se definir a curva de compactação, são necessários convenientemente no mínimo cinco pontos experimentais, sendo dois encontrados no ramo seco da curva (esquerda do gráfico), um no ponto de densidade máxima e o restante no ramo úmido da curva (direita do gráfico) (SENÇO, 1997).

Figura 32 – Exemplo de curva de compactação obtida em um ensaio Proctor.



Fonte: Souza Pinto (2006).

Consoli et al (2018), em seu estudo já citado anteriormente na Seção 2.2.4, realizou ensaios para avaliar as propriedades físicas do rejeito de ouro. Segundo o autor, através do Ensaio de Compactação por Proctor Normal, o material apresentou massa específica seca ( $\gamma_d$ ) máxima de 17 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima ( $\omega$ ) de 17%.

#### 2.3.4. Densidade Real dos Grãos ( $G$ )

A densidade real dos grãos ou também conhecida por densidade relativa das partículas dos solos, consiste na relação entre o peso específico das partículas sólidas ( $\gamma_g$ ), e o

peso específico da água pura a uma temperatura de 4° C ( $\gamma_a$ ) (GEOTÉCNICA, 2019). De acordo com a Equação 2.5.

$$G = \frac{\gamma_g}{\gamma_a} \quad (\text{Equação 2.5})$$

A densidade real (G) e o peso específico das partículas ( $\gamma_g$ ) são numericamente iguais, uma vez que, a 4° C, o peso específico da água ( $\gamma_a$ ) é igual a 1g/cm<sup>3</sup>, sendo que (G) não possui unidade dimensional.

O peso específico dos sólidos varia pouco de solos para solo, é função dos minerais constituintes e da porcentagem de cada um deles no solo. Por si, não permite identificar o solo em questão, mas é necessário para caracterizá-lo quanto aos seus valores de índices físicos (GEOTÉCNICA, 2019).

Tanto a norma rodoviária DNER-ME 093/94 quanto a NBR 6508/2010, apresentam os requisitos, aparelhagem e cálculos para a determinação da densidade real dos grãos pelo método do picnômetro. O procedimento consiste na utilização de um picnômetro, o qual pode ser aquecido ou aplicado a vácuo para retirada total do ar de uma amostra de solo escolhida. A densidade real do solo a uma dada temperatura é calculada de acordo com a Equação 2.6.

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde:

D<sub>t</sub> – Densidade Real do Solo à Temperatura t;

P<sub>1</sub> – Peso do Picnômetro vazio e seco, em g;

P<sub>2</sub> – Peso do Picnômetro mais amostra, em g;

P<sub>3</sub> – Peso do Picnômetro mais amostra, mais água em g;

P<sub>4</sub> – Peso do Picnômetro mais água, em g;

De acordo com Bedin (2010), em seu estudo realizado com rejeito de bauxita, a autora afirma que os rejeitos de bauxita apresentam massa específica dos grãos entre 3,0 e 3,15. A Tabela 8 apresenta resultados de densidade real dos grãos para a lama vermelha e areia vermelha avaliadas no estudo pela autora. Já no estudo realizado por Nierwinski (2007), os valores de massa específica dos grãos variaram entre 2,72 a 3,09 para todas as amostras de rejeito de bauxita avaliadas e apresentadas anteriormente na Tabela 7.

Tabela 8 – Variação de índices físicos de acordo com o material proveniente do rejeito de bauxita.

Material	Posição	w (%)	$\rho_s$
Areia vermelha	Superfície	55	3,00
	Profundidade	60	3,00
Lama vermelha	Superfície	70	3,00
	Profundidade	55	3,15

Fonte: adaptado de Bedin (2010)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo tem como intuito apresentar os materiais utilizados para elaboração dos corpos de prova e detalhar os ensaios realizados na pesquisa.

#### 3.1. Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa são constituídos basicamente pelo rejeito de mineração de bauxita, o agente cimentante, que neste trabalho será o cimento e a água utilizada para compor as misturas.

##### *3.1.1. Rejeito de Mineração de bauxita*

O rejeito de mineração de bauxita, utilizado neste trabalho, consiste de uma amostra de “lama vermelha”, conforme descrição apresentada na revisão bibliográfica do trabalho. As amostras deste rejeito são provenientes de um depósito de rejeitos brasileiro, cujo nome não será apresentado por questões de sigilo.

As amostras de rejeito, utilizadas nos ensaios, chegaram ao laboratório condicionadas em sacos plásticos e ainda apresentavam características da umidade presente no depósito do qual foi extraída. Não se tem informação referente à profundidade exata da coleta do material no interior do depósito, entretanto, por se tratar de uma amostra deformada, acredita-se que tenha sido coletada de forma mais superficial.

O rejeito de mineração de bauxita, estudado neste trabalho, possui coloração avermelhada (Figura 33) e nas condições de umidade natural apresenta-se em grumos e com possibilidade de ser moldado.

Figura 33 – Rejeito de Bauxita na etapa de secagem do material na estufa.



Fonte: Autora (2019).

### *3.1.2. Cimento*

De acordo com Foppa (2005), não existem restrições quanto ao tipo de cimento utilizado em experimentos com solo (rejeito) e cimento. Por isso decidiu-se utilizar no programa experimental o cimento Portland CP II-Z-32, o qual encontra-se disponível junto aos laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, para utilização. A massa específica real dos grãos deste cimento é de 2,96 g/cm<sup>3</sup>.

### *3.1.3. Água destilada*

Para o emprego nas etapas experimentais em laboratório, foi utilizado durante todo o processo a água destilada para composição das misturas. De acordo com Tomasi (2018), o seu uso tem como objetivo estabelecer análises a partir de uma condição padrão para os ensaios laboratoriais.

## **3.2. Metodologia**

Os ensaios previstos para elaboração da pesquisa foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina, do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ). A pesquisa levará em conta a realização de ensaios de caracterização do rejeito de mineração de

bauxita e a avaliação da resistência à compressão e durabilidade de corpos de prova desse material com a adição de cimento.

### 3.2.1. Programa Experimental

O programa experimental tem como principal objetivo avaliar o comportamento mecânico e análise de durabilidade da mistura de rejeito com adição de cimento, levando-se em conta a influência da variação da quantidade de cimento, porosidade e outros parâmetros, como a perda de massa acumulada nos ensaios de durabilidade.

O programa pôde ser dividido em algumas etapas, sendo a primeira fase a realização da caracterização física do rejeito de bauxita, com o intuito de obter propriedades do material.

Na sequência do programa experimental apresentam-se as moldagens das amostras e execução dos ensaios de durabilidade e resistência à compressão simples. Juntamente com o ensaio de compressão é feita a coleta de dados referente ao comportamento de tensão e deformação dos corpos de prova elaborados. Conforme mostra o Quadro 2, é possível observar de forma esquemática as etapas do programa experimental e as normas utilizadas.

Quadro 2 – Esquematização de ensaios realizados com suas normas respectivamente.

ETAPA	MATERIAL	TIPO DE ENSAIO	NORMA
Caracterização dos Materiais	Rejeito	Análise Granulométrica	NBR 7181/2016
		Massa Específica Real dos Grãos	NBR 6508/2008
		Limite de Plasticidade	NBR 7180/2016
		Limite de Liquidez	NBR 6459/2016
		Compactação	NBR 7182/2016
Moldagem	Rejeito-Cimento Compactado	Moldagem	NBR 5738/15
Resistência Mecânica	Rejeito-Cimento Compactado	Resistência a Compressão Simples	ASTM D 5102/2009
		Tensão - Deformação	ASTM D 5102/2009
Durabilidade	Rejeito-Cimento Compactado	Durabilidade	ASTM, D559/2015

Fonte: Autora (2019).

### 3.3. Dosagem

O método de dosagem adotado para a moldagem dos corpos de prova foi através da inserção de porcentagens de cimento em substituição à mesma porcentagem de rejeito de mineração em peso seco. A porcentagem de cimento adicionada foi adotada como a mínima possível (critério econômico), tomando-se como requisito a manutenção da integridade do corpo de prova durante todas as etapas dos ensaios.

Para o cálculo da quantidade de cimento a ser adicionada ao rejeito, inicialmente foi necessária a definição do volume total ( $V_t$ ) ( $\text{cm}^3$ ) que o corpo de prova apresentaria após a moldagem, tanto para os ensaios de compressão simples, quanto para os ensaios de durabilidade. Tendo-se a definição dos valores do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) que seriam adotados nas misturas e, com os dados do volume total ( $V_t$ ) ( $\text{cm}^3$ ) do corpo de prova, foi possível calcular a massa de rejeito seco ( $W_s$  - rejeito) necessária para compor uma mistura com um determinado teor de cimento ( $C$ ), como mostra a Equação 3.1. Em seguida calculou-se a Massa de agente cimentante seca ( $W_s$  - agente cimentante) como mostra a Equação 3.2 e a Massa de água ( $W_a$ ) a ser adicionada, dependente do teor de umidade adotado ( $\omega$ ) na moldagem, como mostra a Equação 3.3.

$$W_{s \text{ rejeito}} = \frac{V_t \times \gamma_d}{(1+C)} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:  $W_{s \text{ rejeito}}$  = Massa de Rejeito Seca (g)

$V_t$  = Volume Total ( $\text{cm}^3$ )

$\gamma_d$  = Peso específico aparente seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$C$  = Teor de agente cimentante (%)

$$W_{s \text{ agente cimentante}} = C \times W_{s \text{ rejeito}} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:  $W_{s \text{ agente cimentante}}$  = Massa do Agente Cimentante (g)

$W_{s \text{ rejeito}}$  = Massa de Rejeito Seca (g)

$C$  = Teor de agente cimentante (%)

$$W_a = w \times W_{S \text{ rejeito}} \times W_{S \text{ agente cimentante}} \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:  $W_a$  = Massa de água (g)

$w$  = Umidade (%)

$W_{S \text{ rejeito}}$  = Massa de Rejeito Seca (g)

$C$  = Teor de agente cimentante (%)

A Tabela 9 apresenta a planilha de dosagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples. Para compor esta tabela foram adotados três porcentagens de cimento (7, 9 e 11%), sendo o valor de 7% definido como mínimo necessário para manter a integridade dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples, devido a justificativa presente no Item 3.4. Além disso, analisaram-se três pesos específicos aparentes secos ( $1,2 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,25 \text{ g/cm}^3$  e  $1,3 \text{ g/cm}^3$ ), definidos com base em valores verificados no interior dos depósitos desses rejeitos e, também, por limitações do próprio procedimento de moldagem dos corpos de prova. Ressalta-se que na separação das quantidades finais de cada material para a moldagem do corpo de prova, foi considerado 10% a mais de todas as quantidades especificadas na Tabela 9, a fim de ter material disponível para verificação da umidade da mistura, bem como, considerar eventuais perdas durante o processo de moldagem. Para a definição do valor de umidade utilizada na etapa de moldagem das amostras, foram avaliados vários valores próximos da umidade ótima (32,22%) do material, fornecido pelo ensaio Proctor Normal. Foi constatado que o teor de umidade no valor de 32,5 % foi o que melhor se adequou para que as amostras não apresentassem “problemas”, como por exemplo a quebra do corpo de prova no procedimento de desmoldagem das amostras (Figura . Além disso, todos os corpos de prova foram moldados em formato cilíndrico com corpos de prova com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Tabela 9 – Dosagem das quantidades do ensaio de resistência à compressão simples das misturas com incorporação de cimento.

Ci (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>T</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>S</sub> (g)	W <sub>S</sub> (rejeito)	W <sub>S</sub> (ci)	W <sub>W</sub> (g)	W <sub>T</sub> (g)
7	1,2	201,30	241,56	225,75	15,80	78,51	320,06
7	1,25	201,30	251,62	235,16	16,46	81,78	333,40
7	1,3	201,30	261,69	244,57	17,12	85,05	346,74
9	1,2	201,30	241,56	221,61	19,95	78,51	320,06
9	1,25	201,30	251,62	230,85	20,78	81,78	333,40
9	1,3	201,30	261,69	240,08	21,61	85,05	346,74
11	1,2	201,30	241,56	217,62	23,94	78,51	320,06
11	1,25	201,30	251,62	226,69	24,94	81,78	333,40
11	1,3	201,30	261,69	235,75	25,93	85,05	346,74

Fonte: Autora (2019).

A Tabela 10 apresenta a planilha de dosagem dos corpos de prova para o ensaio de durabilidade. Para elaborar a tabela foram definidos três valores de pesos específicos aparentes secos (1,2 g/cm<sup>3</sup>; 1,25 g/cm<sup>3</sup> e 1,3 g/cm<sup>3</sup>) e apenas um teor de cimento definido em 7%, considerado o teor mais crítico encontrado, sendo a sua justificativa presente no Item 3.4. Os corpos de prova foram moldados com um cilindro de dimensões maiores que o ensaio de resistência à compressão simples, resultando em amostras de 10,10 cm de diâmetro e com 12,5 cm de altura. Pelos mesmos motivos evidenciados no ensaio de resistência à compressão simples, os corpos de prova para o ensaio de durabilidade foram moldados com teor de umidade de 32,5 % e foi considerado também 10% a mais de todas as quantidades especificadas apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Dosagem das quantidades do ensaio de durabilidade das misturas com incorporação de cimento.

Ci (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>T</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>S</sub> (g)	W <sub>S</sub> (rejeito)	W <sub>S</sub> (ci)	W <sub>W</sub> (g)	W <sub>T</sub> (g)
7	1,2	1005,49	1206,58	1127,65	78,94	392,14	1598,72
7	1,25	1005,49	1256,86	1174,63	82,22	408,48	1665,34
7	1,3	1005,49	1307,13	1221,62	85,51	424,82	1731,95

Fonte: Autora (2019).

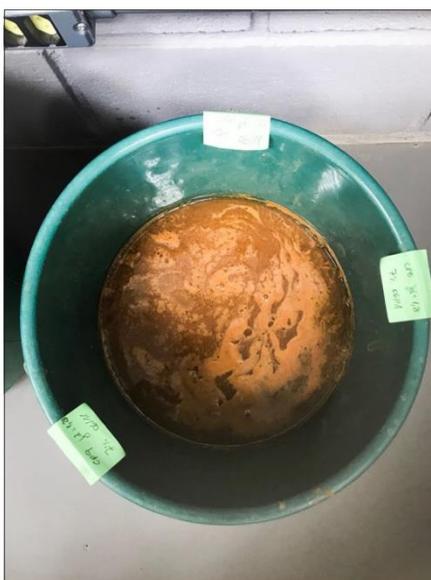
### 3.4. Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Para a realização do ensaio foram utilizadas as diretrizes apresentadas pela norma NBR 5738 (ABNT, 2015), as quais se resumem na moldagem, cura úmida e saturação das amostras. Além da normatização nacional, utilizou-se a norma americana ASTM D 5102/2009 como base para o rompimento dos corpos de prova.

No estágio inicial do estudo referente à resistência à compressão de corpos de prova de rejeitos de bauxita, tratados com cimento, foram definidos três valores iniciais de porcentagem de cimento, levando-se em consideração o aspecto econômico, sendo eles: 3%, 5% e 7%. Essas porcentagens, de acordo com o método de dosagem adotado, significam a quantidade de rejeito seco que é substituído pelo cimento.

Com o decorrer do ensaio, se tornou evidente a inviabilidade do uso das porcentagens de 3% e 5% de cimento, pois na etapa de imersão das amostras em água, as mesmas se desmancharam por completo (Figura 34). Por esse motivo foram estabelecidos novos valores de porcentagem, considerando o valor mínimo de adição de cimento para este tipo de ensaio em rejeitos de mineração de bauxita, como sendo igual a 7%, no qual os corpos de prova permaneceram íntegros durante a etapa de saturação (Figura 35). Sendo assim, as novas porcentagens de adição de cimento adotadas foram: 7%, 9% e 11%.

Figura 34 – Dissolução total das amostras de rejeito com cimento (3 e 5% em massa) na etapa de saturação.



Fonte: Autora (2019).

Figura 35 – Etapa de saturação para as porcentagens de 7% de cimento, sem a ocorrência de dissolução das amostras.

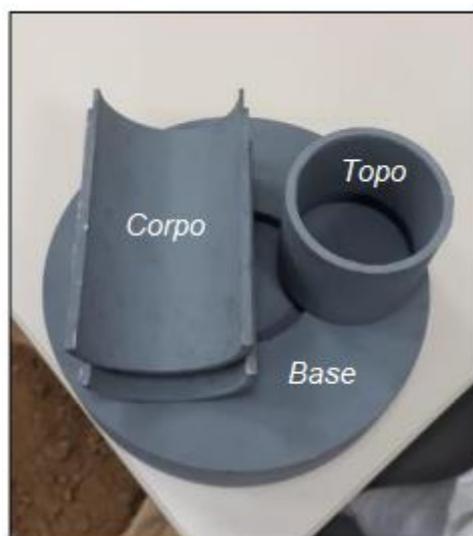


Fonte: Autora (2019).

Conforme comentado no Item 3.3 deste trabalho, os corpos de prova para os ensaios de compressão, foram moldados com três valores de peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) para cada teor de cimento avaliado, sendo os valores de  $\gamma_d$  adotados: 1,20 g/cm<sup>3</sup>, 1,25g/cm<sup>3</sup> e 1,30 g/cm<sup>3</sup>.

Para o procedimento de elaboração dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples, foi desenvolvido para essa pesquisa um molde bipartido como mostra a Figura 36. O conjunto que compõe este molde é composto por três partes: base, corpo e topo. O corpo do molde foi confeccionado em forma cilíndrica em duas partes, com o objetivo de facilitar o processo de desmoldagem do corpo de prova. Já a base, além de ser mais espessa, o que traz maior estabilidade ao processo de moldagem, possui uma “abertura” para o encaixe do corpo do molde, dando estabilidade ao mesmo. E por último o topo, serve como elemento de fixação do cilindro bipartido, mantendo as duas partes do corpo unidas durante a etapa de moldagem. Com esse molde foram moldados corpos de prova com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Figura 36 – Molde Bipartido Confeccionado



Fonte: Autora (2019).

Para o processo de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão, foram seguidas as diretrizes da norma NBR 5738 (ABNT, 2015). Inicialmente as quantidades de cada material (rejeito, cimento e água), definidas através da planilha de dosagem, foram separadas e misturadas adequadamente, até a sua completa homogeneização. A quantidade total da mistura necessária para compor um corpo de prova foi dividida em três partes, a fim de facilitar o processo de compactação e permitir uma maior homogeneidade de propriedades ao longo do corpo de prova moldado. O processo de compactação de cada uma das camadas, com altura definida de 33,33 mm, foi realizada de forma manual com o auxílio de um soquete. Após a moldagem, os corpos de prova foram levados à cura, durante um período de 7 dias corridos. Além disso, como exigido pela norma, foram moldados três corpos de prova para cada uma das composições estudadas, o que levou a um total de 27 corpos de prova moldados, conforme exemplo mostrado pela Figura 37. Foram considerados aceitáveis, os corpos de prova que apresentaram variações máxima de altura de  $\pm 0,2$  cm e uma variação máxima de peso total esperado do corpo de prova, de  $\pm 2\%$ .

Figura 37 – Exemplo de corpo de prova desenvolvido para o ensaio de Resistência à compressão simples.



Fonte: Autora (2019).

Para o processo de cura dos corpos de prova, os mesmos foram inseridos em sacolas plásticas, que foram devidamente vedadas, conforme demonstra a Figura 38. No sexto dia após o início do processo de cura, os corpos de prova foram levados à imersão em água por um período de 24 horas, para que fossem saturados. Após essa etapa de saturação, os corpos de prova foram retirados da água, secos superficialmente e, levados para ruptura.

Figura 38 – Amostras ensacadas e devidamente vedadas.



Fonte: Autora (2019).

A ruptura dos corpos de prova foi realizada com o auxílio de uma prensa utilizada para o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), na qual utilizou-se um anel dinamométrico, devidamente calibrado, para a obtenção da carga aplicada ao corpo de prova. Acoplou-se um extensômetro ao equipamento para o acompanhamento das deformações

durante a aplicação das cargas. A Figura 39 demonstra a execução da ruptura do corpo de prova.

Figura 39 – Prensa utilizada para ruptura dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2019).

### 3.5. Ensaio de Durabilidade

As etapas e procedimentos para a realização do ensaio de durabilidade são baseados na norma ASTM, D559/2003 (Standard Test Methods for Wetting and Drying Compactes Soil-Cement). A norma prescreve o método para a determinação de perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzidos por ciclos de molhagem e secagem de corpos de prova de misturas de solo-cimento (NOVAES, 2016).

A etapa inicial do ensaio consistiu na moldagem dos corpos de prova (Figura 40). O procedimento de moldagem adotado para os corpos de prova do ensaio de durabilidade são idênticos àqueles adotados para moldagem das amostras para o ensaio de resistência à compressão simples, entretanto, para este ensaio foi utilizado um molde de maiores dimensões. O molde deste ensaio foi o cilindro pequeno utilizado para ensaios de compactação de solo, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 127 mm de altura, conforme apresentado na Figura 41.

Para moldagem dos corpos de prova separam-se as quantidades necessárias de cada material (rejeito, cimento e água), em conformidade com a planilha de dosagem, misturando-os em seguida. Como o corpo de prova para este ensaio é maior que os corpos de prova do ensaio de compressão, optou-se por dividir a mistura devidamente homogeneizada em 5

partes, a fim de facilitar a compactação das camadas e garantir uma melhor homogeneidade do corpo de prova. O processo de moldagem no cilindro consistiu na compactação realizada de forma manual com o auxílio de um soquete, das cinco camadas, cada uma com espessura aproximada de 2,5 cm.

Figura 40 – Exemplo de corpo-de-prova moldado para o ensaio de durabilidade.



Fonte: Autora (2019).

Figura 41 – Molde para ensaio CBR para a moldagem das amostras utilizadas no ensaio de Durabilidade.



Fonte: Autora (2019).

Após o processo de moldagem, cada corpo de prova foi pesado e suas dimensões foram verificadas com o auxílio de um paquímetro digital. Em seguida, os corpos-de-prova foram embalados em sacos plásticos devidamente numerados e levados à cura, por um período de 7 dias corridos.

Após a cura, seguindo-se as diretrizes da norma ASTM D 559/2003, foram realizados 12 ciclos, com duração de 48 horas cada um, para a finalização do ensaio de durabilidade. O Quadro 3 apresenta a descrição destes ciclos.

Quadro 3 – Descrição das etapas realizadas por cada ciclo.

Primeiro Ciclo		Segundo Ciclo		Terceiro Ciclo	
Etapa	Período	Etapa	Período	Etapa	Período
Imersão dos Corpos de Prova em água	5h	Imersão dos Corpos de Prova em água	5h	...	...
Secagem em estufa a 71 ° C	42h	Secagem em estufa a 71 ° C	42h		
Intervalo para Secagem e Pesagem	1h	Intervalo para Secagem e Pesagem	1h		

Fonte: Autora (2019).

Após a cura de 7 dias dos corpos de prova, iniciaram-se os ciclos de secagem e umedecimento. Assim, inicialmente os corpos de prova foram deixados em imersão na água por um período de 5 horas. Na sequência, os corpos de prova foram levados para a estufa por um período de 42 horas. Os corpos de prova foram então retirados da estufa e foram devidamente pesados. Em seguida com o auxílio de uma escova com cerdas de aço, os corpos de prova foram escovados (Figura 42) em 20 passadas da escova, distribuídas em 2 vezes em todas as extremidades do corpo de prova, aplicando-se uma força de 13,3 N. Ao término da escovação, o material “perdido” devido ao procedimento de escovação foi separado e pesado, como também, o próprio corpo de prova. Ao término desta etapa o corpo de prova era levado novamente à imersão em água, dando início ao próximo ciclo.

Figura 42 – Exemplo da etapa de escovação no ensaio de durabilidade.



Fonte: Autora (2019).

Como o ensaio de durabilidade tem como objetivo principal a “replicação” mais próxima possível das intempéries ocorridas em campo, foram realizados três corpos de prova para este ensaio, considerando a situação mais crítica de tratamento do material com cimento (7%) e para os três valores de peso específico seco ( $\gamma_d$ ) de 1,2 g/cm<sup>3</sup>, 1,25 g/cm<sup>3</sup> e 1,3 g/cm<sup>3</sup>, totalizando três corpos de prova ensaiados.

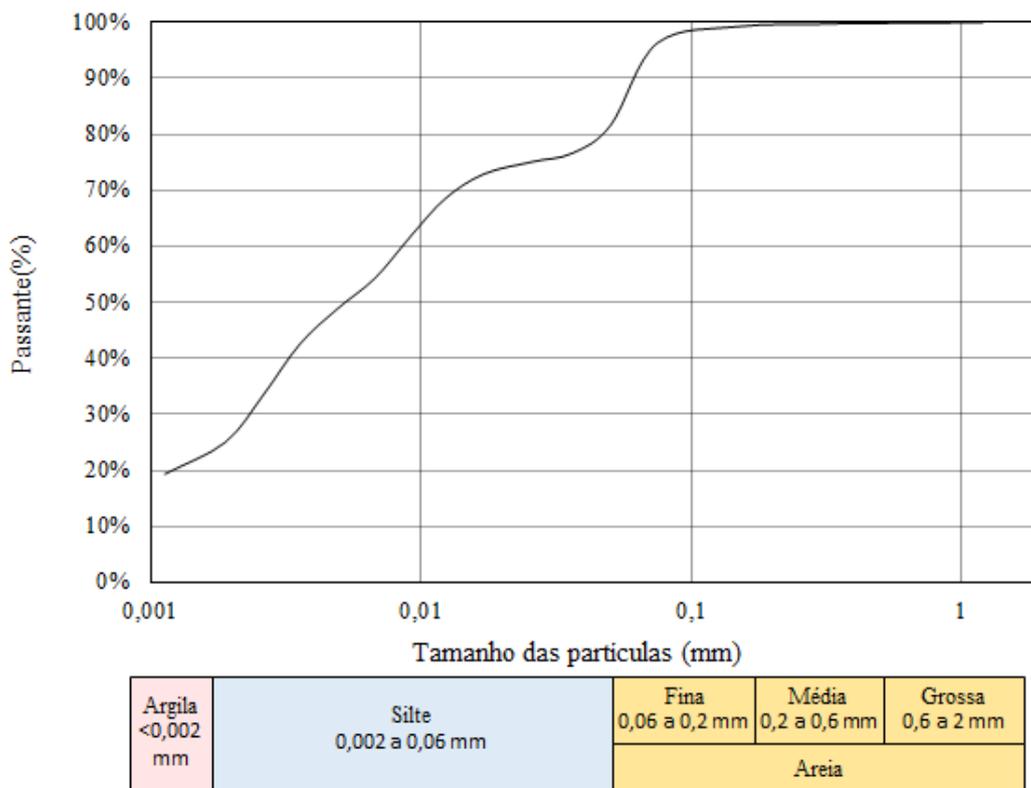
## 4. RESULTADOS

Este capítulo tem como intuito apresentar os resultados obtidos por meio dos ensaios de resistência à compressão simples e ensaio de durabilidade dos corpos de prova constituídos por rejeito de mineração de bauxita e cimento.

### 4.1. Caracterização Do Rejeito De Mineração De Bauxita

O resultado da avaliação de análise granulométrica é apresentado na Figura 43. Como é possível observar o rejeito de mineração de bauxita apresenta predominância de partículas do tamanho de silte (~60%), e parcelas menores de partículas do tamanho de argila (~23%) e areia (~17%). A distribuição granulométrica do rejeito estudado apresenta concordância com os resultados da literatura, citados no item 2.3.1 deste trabalho.

Figura 43 – Curva Granulométrica do rejeito de mineração de bauxita.



Fonte: Autora (2019).

Além disso, a Tabela 11 apresenta os outros índices físicos definidos através dos ensaios de caracterização do rejeito de bauxita. Em relação a plasticidade, a bauxita

apresentou valores de LL e LP medianos (32 e 30%, respectivamente), entretanto, um índice de plasticidade baixo (2%), indicando que o rejeito apresenta fraca plasticidade. A densidade real dos grãos (G) apresentou valor de 2,877, sendo este valor relativamente alto quando comparado à valores de G para solos naturais, em virtude da presença de metais na composição dos rejeitos de mineração.

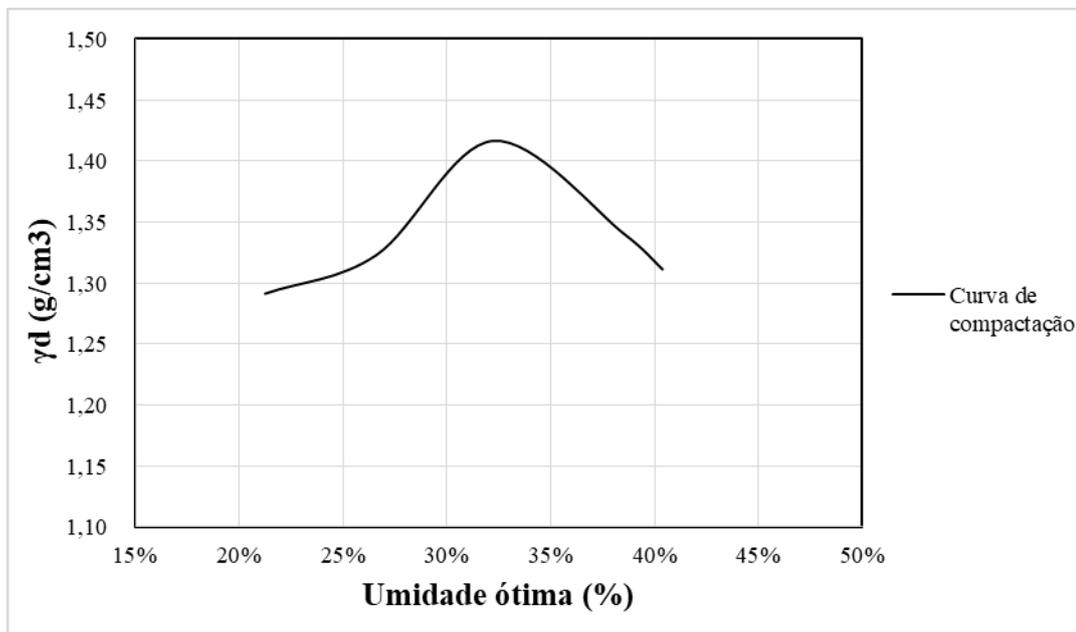
Tabela 11 – Índices Físicos encontrados para o rejeito de bauxita.

<b>Densidade Real dos Grãos (G)</b>	2,877
<b>LL (%)</b>	32
<b>LP (%)</b>	30
<b>IP (%)</b>	2
<b>Umidade Ótima (%)</b>	32,22
<b><math>\gamma_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,417

Fonte: Autora (2019).

Como apresentado na Tabela 11, os valores de peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ ) e umidade ótima para o rejeito, obtidos através do ensaio de compactação por Proctor Normal, foram de 1,417g/cm<sup>3</sup> e 32,22%, respectivamente. A Figura 44 ilustra o resultado do ensaio de compactação.

Figura 44 – Resultado do ensaio de compactação por Proctor Normal.



Fonte: Autora (2019).

## 4.2. Ensaio De Resistência À Compressão Simples

A Tabela 12 apresenta o resumo dos resultados médios obtidos para os corpos de prova do ensaio de resistência à compressão simples, elaborados para a seguinte pesquisa. Ressalta-se que foram elaborados três corpos de prova para cada combinação de peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e teor de cimento, conforme recomendado pela norma NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo os valores da tabela referente a média dessas três amostras elaboradas. A Tabela 12 apresenta as informações da resistência à compressão média ( $q_u$ ), o valor da porosidade média ( $\eta$ ), a porcentagem de cimento em volume média dos corpos de prova ( $C_{iv}$ ) e a relação média ( $\eta / C_{iv}^{0,28}$ ), que conforme comentado no referencial teórico (Item 2.2.2 deste trabalho) é utilizada com frequência em estudos de dosagens de materiais. A determinação das propriedades de porosidade e teor de cimento em volume depende das características físicas do corpo de prova, sendo que os cálculos destas propriedades podem ser encontradas nas Tabelas A, B e C presentes no anexo A deste trabalho.

Os dados constantes na Tabela 12 foram utilizados para as análises e figuras apresentadas nos itens a seguir.

Tabela 12 – Resumo dos Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Simples.

Corpo de Prova	Teor de Cimento (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	qu (KPa)	$\eta$ (%)	Civ (%)	$\eta / \text{Civ}^{0,28}$ (%)
1	7	1,20	215,52	58,58	2,64	43,95
2						
3						
4	7	1,25	461,81	57,17	2,73	43,16
5						
6						
7	7	1,30	582,26	55,26	2,81	41,22
8						
9						
10	9	1,20	275,05	59,26	3,28	42,51
11						
12						
13	9	1,25	519,49	58,21	3,35	41,54
14						
15						
16	9	1,30	840,18	56,37	3,51	39,57
17						
18						
19	11	1,20	333,30	59,88	3,88	40,94
20						
21						
22	11	1,25	723,08	57,23	4,10	38,48
23						
24						
25	11	1,30	1076,85	56,06	4,24	37,40
26						
27						

Fonte: Autora (2019).

#### 4.2.1. Efeito do Teor de Cimento

A Figura 45 apresenta a variação da resistência à compressão simples em função da porcentagem de cimento adicionada ao rejeito. Cada reta separadamente representa um valor de peso específico aparente seco ensaiado, sendo todos os corpos de prova moldados com a mesma unidade. Como foram elaborados três corpos de prova idênticos para cada combinação de peso específico aparente seco e porcentagem de cimento, cada ponto na curva representa a média desses três valores.

Para todos os casos avaliados verificou-se um acréscimo da resistência à compressão em função do aumento da porcentagem de cimento acrescentada às misturas. Esta condição está de acordo com as tendências observadas na literatura consultada.

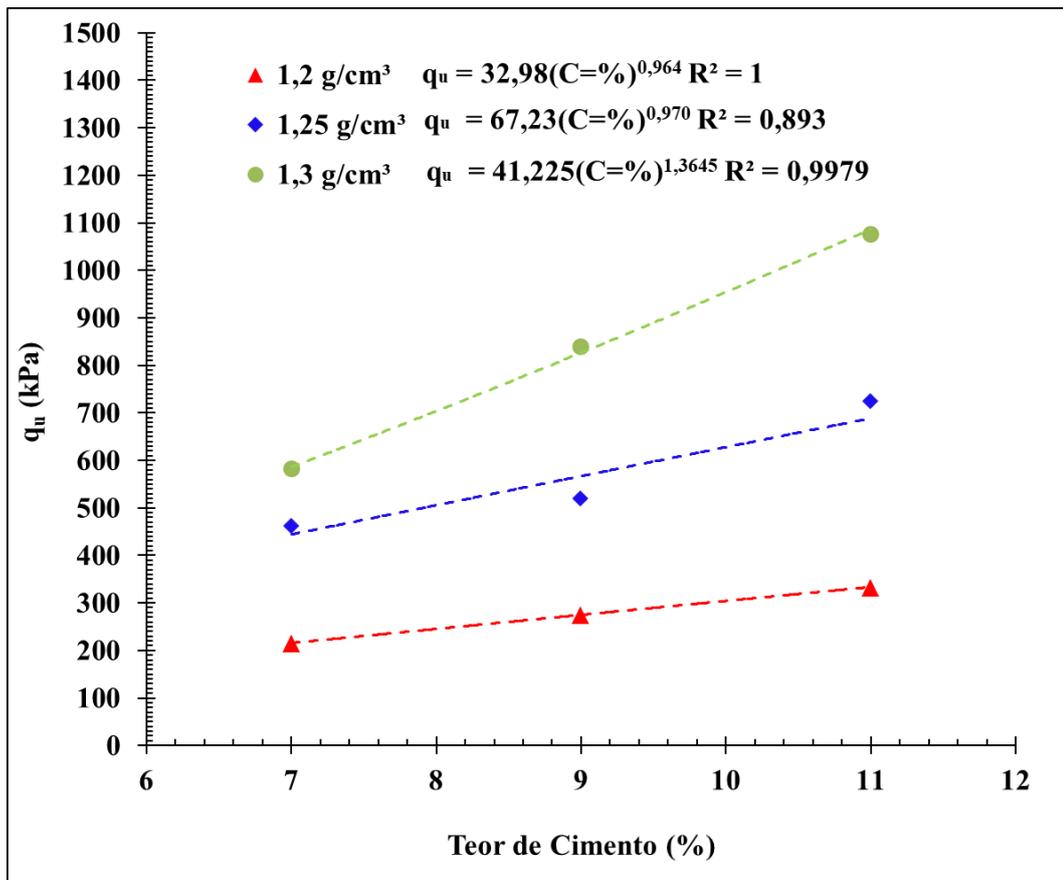
Evidencia-se através da análise da Figura 45 que o crescimento da resistência em função da porcentagem de cimento torna-se mais acentuado para valores de  $\gamma_d$  de 1,3 g/cm<sup>3</sup> e verifica-se uma similaridade no crescimento para os  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup> e  $\gamma_d$  de 1,25 g/cm<sup>3</sup>. Possivelmente nos corpos de prova com  $\gamma_d$  de 1,3 g/cm<sup>3</sup> tenha-se obtido, na hora do processo de moldagem, uma interação maior entre as partículas de rejeito e o cimento. Além disso, é possível observar que a taxa de aumento da resistência, independentemente do teor de cimento, aumenta com o acréscimo dos valores de  $\gamma_d$  da mistura. Pode-se dizer, de maneira geral, que com o mesmo teor de cimento, há ganhos de resistências significativas no material, apenas aumentando-se a densidade da mistura.

Para os corpos de prova com adição de cimento de 7% em peso, por exemplo, foi verificada uma resistência em torno de 220 Kpa para um  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup>, 470 Kpa para um  $\gamma_d$  de 1,25 g/cm<sup>3</sup> e 580 Kpa para um  $\gamma_d$  de 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Sendo verificado praticamente o dobro da resistência nos corpos de prova com  $\gamma_d = 1,2$  g/cm<sup>3</sup> em relação aos corpos de prova com  $\gamma_d = 1,25$  g/cm<sup>3</sup>, o que demonstra a alta contribuição do aumento da densidade na resistência à compressão.

O efeito do aumento da resistência à compressão em função do aumento da densidade dos corpos de prova também pode ser verificado para as porcentagens de cimento de 9 e 11%. Para o teor de 9% de cimento, verificam-se valores em torno de 260 Kpa para um  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup>, 530 Kpa para um  $\gamma_d$  de 1,25 g/cm<sup>3</sup> e 880 Kpa para um  $\gamma_d$  de 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Para o teor de 11% de cimento, foi verificado valores em torno de 290 Kpa para um  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup>, 660 Kpa para um  $\gamma_d$  de 1,25 g/cm<sup>3</sup> e 1080 Kpa para um  $\gamma_d$  de 1,3 g/cm<sup>3</sup>.

Por meio dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, apresentado na Figura 45 foi possível, ainda, definir um equacionamento para permitir a determinação da resistência à compressão, em função da porcentagem de cimento acrescentada, para cada valor de  $\gamma_d$  de misturas de rejeito de mineração de bauxita e cimento. Com a aplicação destas formulações é possível se estimar os valores de  $q_u$  para outros teores de cimento, não ensaiados neste trabalho, considerando este mesmo rejeito e os respectivos valores de  $\gamma_d$  das misturas. Estas equações são apresentadas na Figura 45.

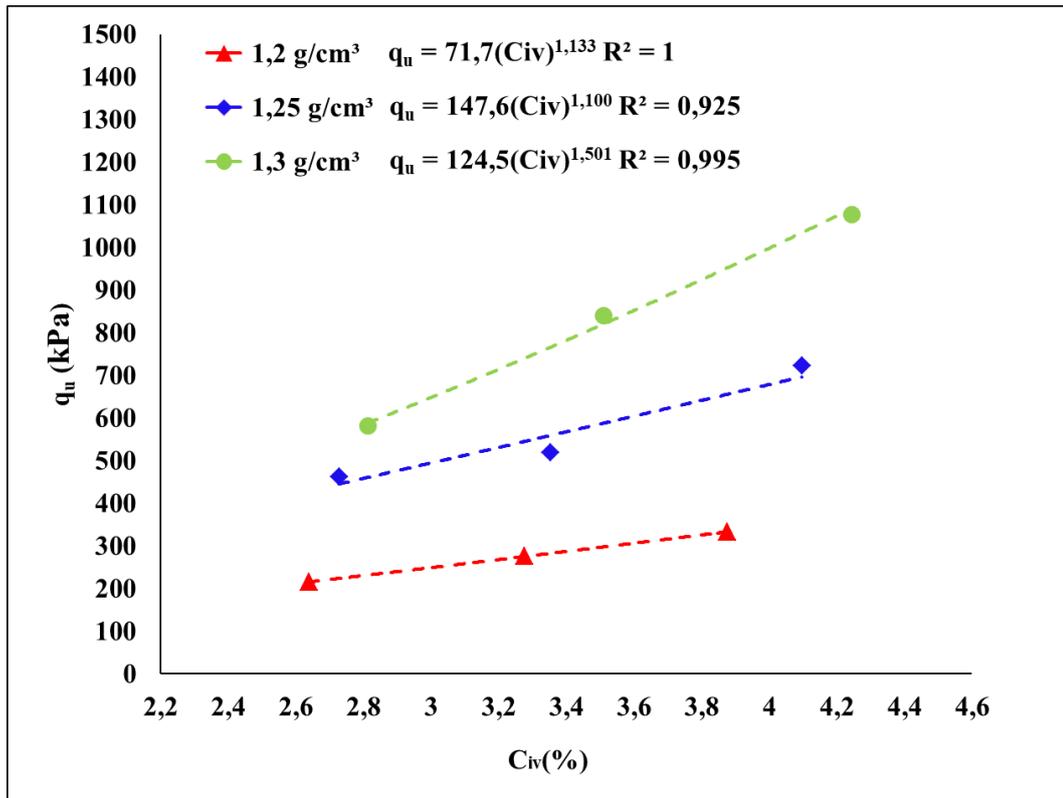
Figura 45 – Variação da resistência à compressão em função do teor de cimento incorporado.



Fonte: Autora (2019).

A mesma análise realizada em função da porcentagem de cimento também pode ser efetuada em função do teor de cimento em volume (Civ), conforme apresentado pela Figura 46. Como o teor de cimento em volume é diretamente proporcional à porcentagem de cimento acrescentada em massa, as mesmas observações em relação ao ganho de resistência são válidas. A única alteração que se tem é no equacionamento definido para  $q_u$  em função de Civ.

Figura 46 – Variação da resistência a compressão simples em função do teor volumétrico de cimento.



Fonte: Autora (2019).

#### 4.2.2. Efeito da Porosidade

A Figura 47 apresenta a relação entre a resistência a compressão do material em função da porosidade dos corpos de prova. É importante ressaltar que, neste caso, cada curva elaborada separadamente, possui o mesmo teor de cimento e cada ponto da curva representa uma combinação de índices físicos ensaiados. Além disso, salienta-se que os valores apresentados na figura representam a média dos três corpos de prova elaborados de maneira idêntica com o mesmo peso específico aparente seco e porcentagem de cimento.

Em análise à Figura 47 verifica-se um aumento exponencial da resistência à compressão com a redução da porosidade dos corpos de prova. Esta tendência é evidenciada para todos os teores de cimento analisados, sendo que, como discutido anteriormente, quanto maior a porcentagem de cimento, maior será a resistência do material. Tal comportamento é compatível com análises apresentadas pela literatura correspondente.

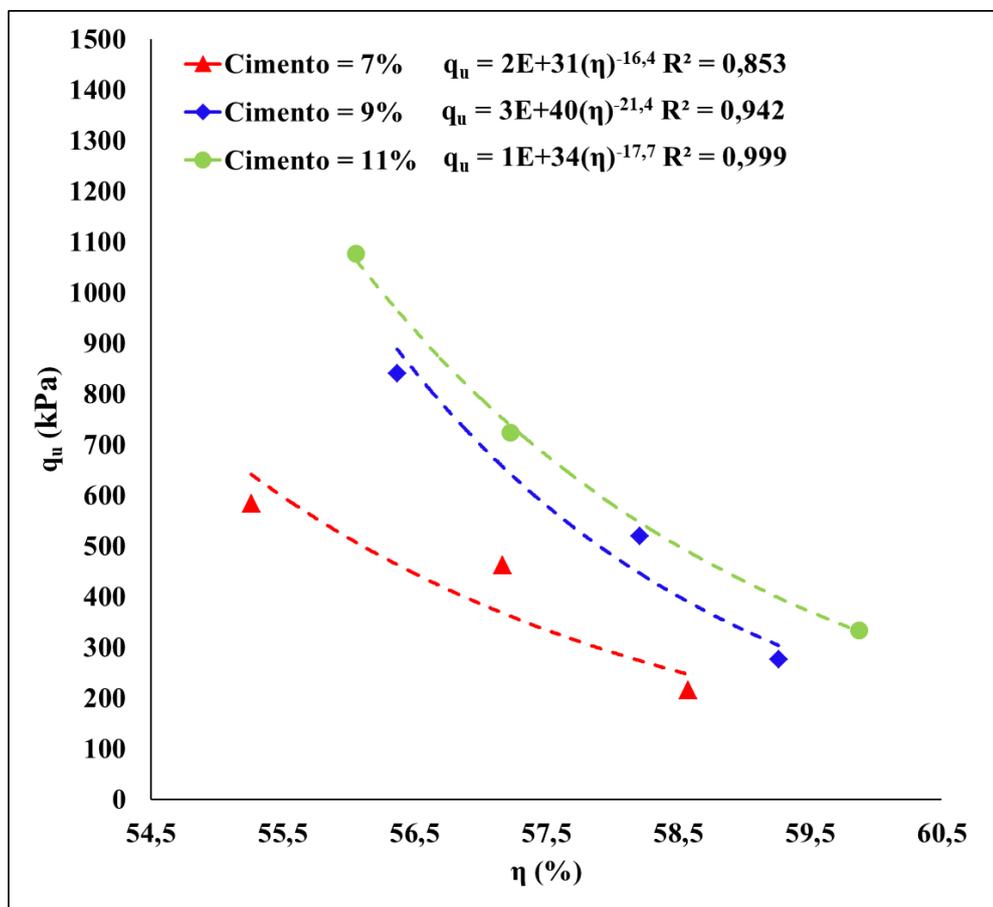
O aumento da resistência em função da porosidade é bem mais expressivo para os corpos de prova com  $\gamma_d$  de 1,25 e 1,3 g/cm<sup>3</sup>, nos quais possivelmente tem-se uma condição de melhor iteração do cimento com as partículas do rejeito. Este comportamento é evidenciado

pela similaridade na tendência das curvas plotadas para estas duas condições. Para os corpos de prova com  $\gamma_d$  de 1,20 g/cm<sup>3</sup> o aumento da resistência em função da redução da porosidade é bem mais sutil.

Salienta-se que as menores porosidades são encontradas nos corpos de prova moldados com os menores valores de  $\gamma_d$ . Como os valores de  $\gamma_d$  estudados neste trabalho são próximos, a faixa de variação da porosidade também é baixa, variando entre 55 e 60%. Desta forma, a dispersão nos valores de porosidade plotados na Figura 47 pode ser relacionada à escala ampliada adotada e também à possíveis interferências durante o processo de moldagem.

Assim como apresentado na análise da resistência à compressão em função da porcentagem e teor volumétrico de cimento adicionado, também se definiu o equacionamento de  $q_u$  em função da porosidade do material, para cada teor de cimento avaliado. Desta forma, pode-se estimar valores de  $q_u$  para misturas de rejeito e cimento, em diferentes valores de porosidade. Estes equacionamentos são apresentados na Figura 47.

Figura 47- Variação da resistência em função da porosidade.

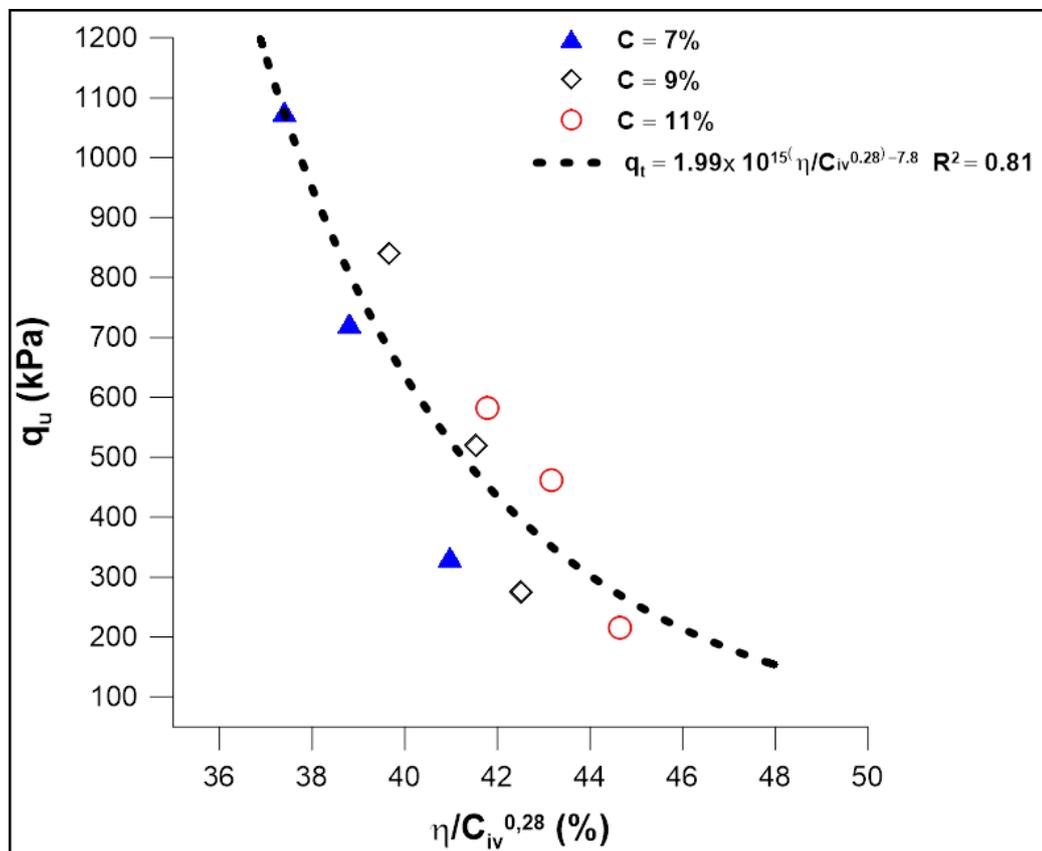


Fonte: Autora (2019).

Na Figura 48 apresenta-se a variação da resistência à compressão do material em função  $\eta / C_{iv}^{0,28}$ . Conforme apresentado no referencial teórico, que dá suporte a este trabalho, a relação  $\eta / C_{iv}^{0,28}$  é muito utilizada para definição de um equacionamento único, que permite a estimativa de  $q_u$  para a mistura avaliada, considerando tanto variações da porosidade quanto do teor de cimento acrescentado. Sendo assim, cada ponto presente na Figura 48, representa a combinação entre a porosidade do material, que pode ser correlacionada com  $\gamma_d$ , com uma respectiva porcentagem de cimento. É possível observar que para misturas avaliadas encontrou-se uma correlação mediana ( $R^2 = 0,81$ ), a qual poderia ser utilizada para uma estimativa da ordem de grandeza  $q_u$  de misturas deste rejeito com cimento. Como a variação de  $\gamma_d$  estudada neste trabalho foi baixa, a variação de  $\eta / C_{iv}^{0,28}$  também não foi abrangente (38 a 48, conforme Figura 48), fato que pode ter afetado a definição da correlação com maior precisão. Este equacionamento é apresentado na Figura 48.

De modo geral, os valores de  $q_u$  são crescentes exponencialmente com a redução de  $\eta / C_{iv}^{0,28}$ , ou seja, com o aumento do teor de cimento e redução da porosidade, conforme análises anteriormente realizadas, considerando cada uma das propriedades independentes.

Figura 48- Variação da Resistência a compressão em função do  $\eta / C_{iv}^{0,28}$ .



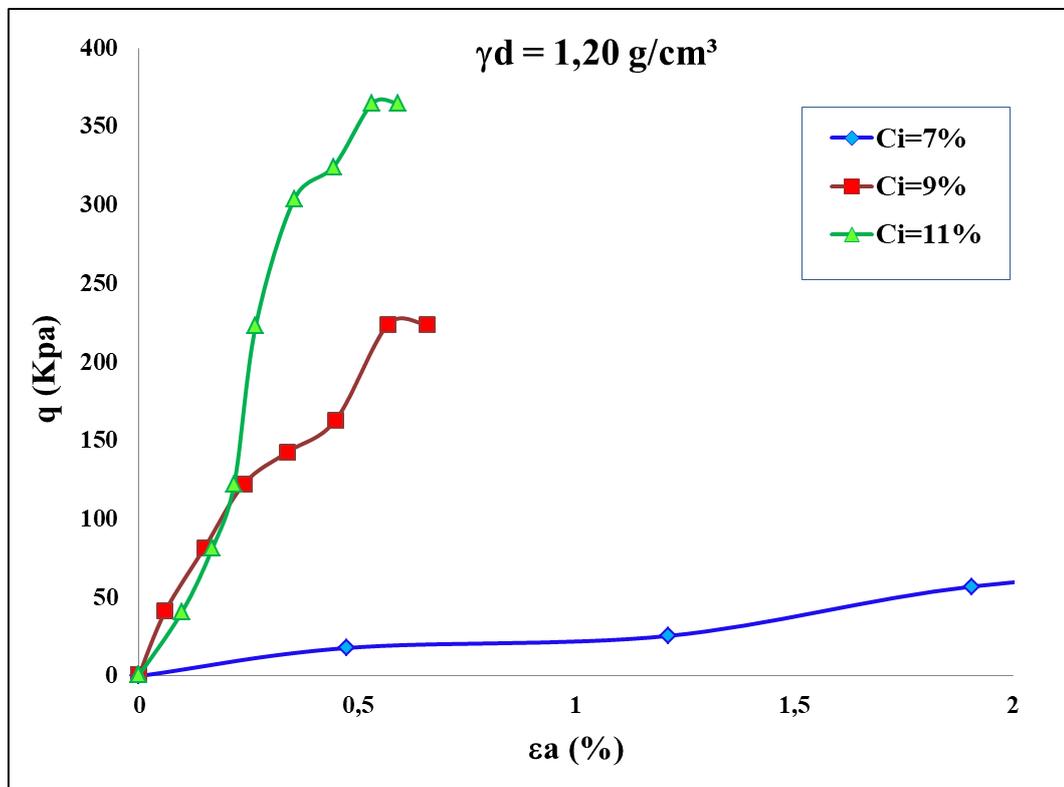
Fonte: Autora (2019).

### 4.3. Relação Tensão-Deformação

Além da definição dos valores da resistência à compressão dos corpos de prova moldados com rejeito e cimento, efetuou-se uma avaliação do comportamento de tensão *versus* deformação durante a aplicação das cargas. As Figuras 49, 50, 51 e 52 representam os dados referentes aos três valores de  $\gamma_d$  analisados: 1,2 g/cm<sup>3</sup>, 1,2 g/cm<sup>3</sup>, 1,25 g/cm<sup>3</sup> e 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Para esta análise optou-se por selecionar o comportamento de um corpo de prova de referência, para cada mistura avaliada. No eixo das abcissas são representadas as porcentagens de deformação ( $\epsilon_a$ ) e no eixo das ordenadas os valores da tensão aplicada (q).

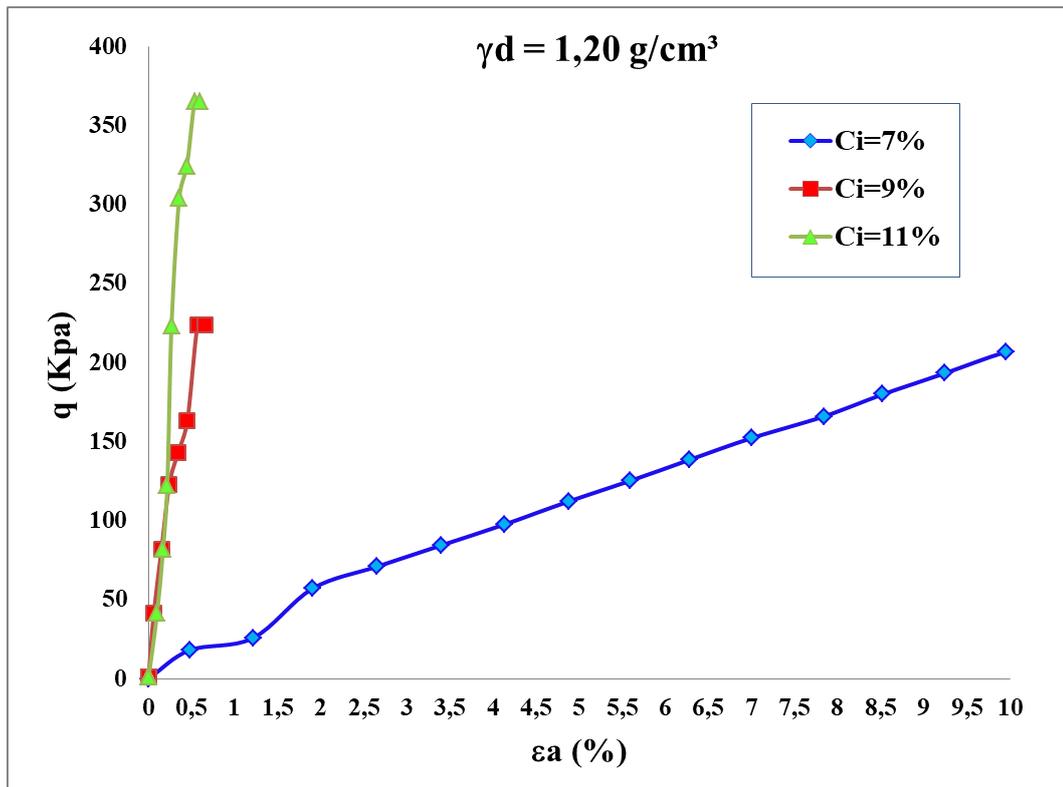
A Figura 49 e 50 mostram os resultados referentes ao  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup>, sendo cada curva correspondente a uma porcentagem de cimento (7%, 9% e 11%). Verifica-se que o aumento da porcentagem de cimento tornou os corpos de prova mais rígidos, ou seja, a ruptura ocorreu para baixos níveis de deformação (~0.6%) e de uma forma abrupta. Já para o teor de cimento de 7% o acréscimo de carga foi acompanhado de deformações, sendo observada a carga máxima apenas com uma deformação em torno de 10% .

Figura 49 – Variação da tensão-desvio em função da deformação para  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup> em escala menor.



Fonte: Autora (2019).

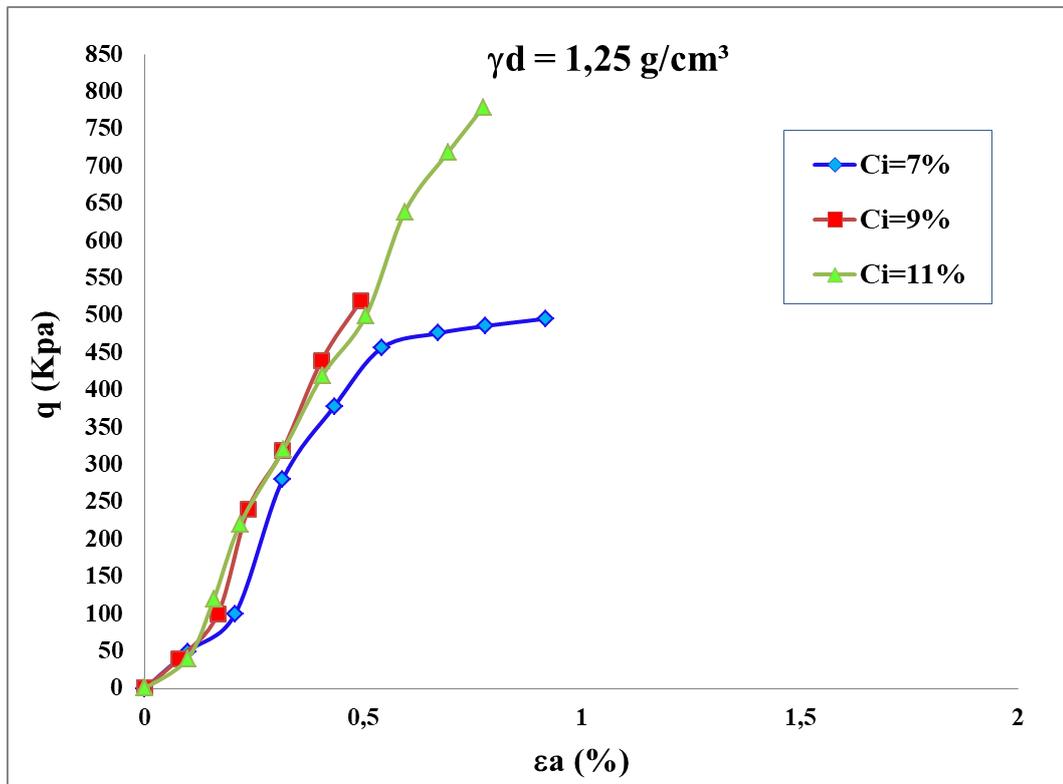
Figura 50 – Variação da tensão-desvio em função da deformação para  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup> em escala maior.



Fonte: Autora (2019).

A Figura 51 apresenta os resultados referentes ao  $\gamma_d$  de 1,25 g/cm<sup>3</sup>. Conforme se pode observar ainda para o corpo de prova com porcentagem de cimento de 7% se tem as maiores deformações para que seja atingida a carga máxima referente a essa porcentagem. Para as porcentagens de cimento de 9 e 11% a carga máxima foi atingida para valores aproximados de 0,5 e 0,8% de deformação, respectivamente.

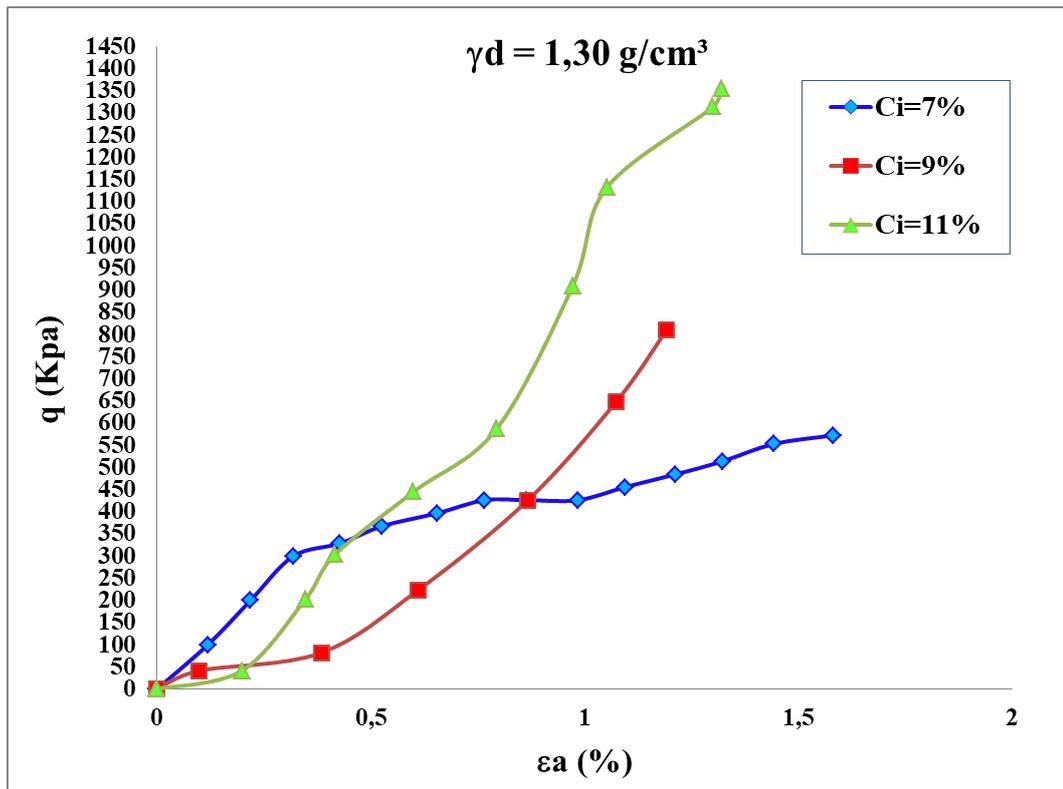
Figura 51 - Variação da tensão-desvio em função da deformação para  $\gamma_d$  de 1,25 g/cm<sup>3</sup>.



Fonte: Autora (2019).

E finalmente, a Figura 52 apresenta os resultados de tensão *versus* deformação para os corpos de prova com  $\gamma_d$  de 1,3 g/cm<sup>3</sup>, com os três teores de cimento já citados anteriormente. Para os valores com porcentagem de cimento de 7%, é possível observar que o ganho de resistência ocorre com a deformação do corpo de prova, assim como ocorreu para os outros valores de  $\gamma_d$ . Este corpo de prova atingiu a carga máxima com cerca de 1,6% de deformação. Já para os outros valores de  $\gamma_d$  (1,25 e 1,3 g/cm<sup>3</sup>) a carga máxima foi atingida em cerca de 1,2 e 1,3 % de deformação, respectivamente.

Figura 52 - Variação da tensão-desvio em função da deformação para  $\gamma_d$  de 1,30 g/cm<sup>3</sup>.



Fonte: Autora (2019).

#### 4.4. Modo de Ruptura

Segundo Foppa (2005), é possível elencar em duas definições o modo de ruptura, sendo elas: ruptura frágil e ruptura dúctil. De acordo com o autor a ruptura frágil pode ser caracterizada como uma perda instantânea da resistência quando alcançado a sua tensão de desvio máxima, ocasionando assim planos de rupturas bem definidos no material. Essa característica é identificada em materiais mais rígidos como: argila pré-adensada, solos cimentados e entre outros. Já para a ruptura dúctil não apresenta comportamentos na queda da resistência quando alcançado a máxima tensão desvio, ocasionando planos de rupturas não definidos. Comportamento esse presente em materiais como areias fofas e argila normalmente adensada.

As Figura 53 e 54 apresentam planos de rupturas observados para corpos de prova com porcentagens de cimento de 9 e 11% e valores de  $\gamma_d$  distintos. Foi possível observar que o plano de ruptura dos corpos de prova com porcentagens de cimento de 9 e 11% se caracterizou como frágil, independente da densidade seca do material. Sendo de maneira

geral, o ângulo entre o plano de ruptura e o local da aplicação da tensão vertical maior no corpo de prova, de aproximadamente  $85^\circ$ , ou seja, praticamente no meio da amostra.

Figura 53 – Plano de Ruptura para amostra com  $\gamma_d$  de  $1,20 \text{ g/cm}^3$  e teor de cimento de 9%.



Fonte: Autora (2019).

Figura 54 – Plano de Ruptura para amostra com  $\gamma_d$  de  $1,30 \text{ g/cm}^3$  e teor de cimento de 11%.



Fonte: Autora (2019).

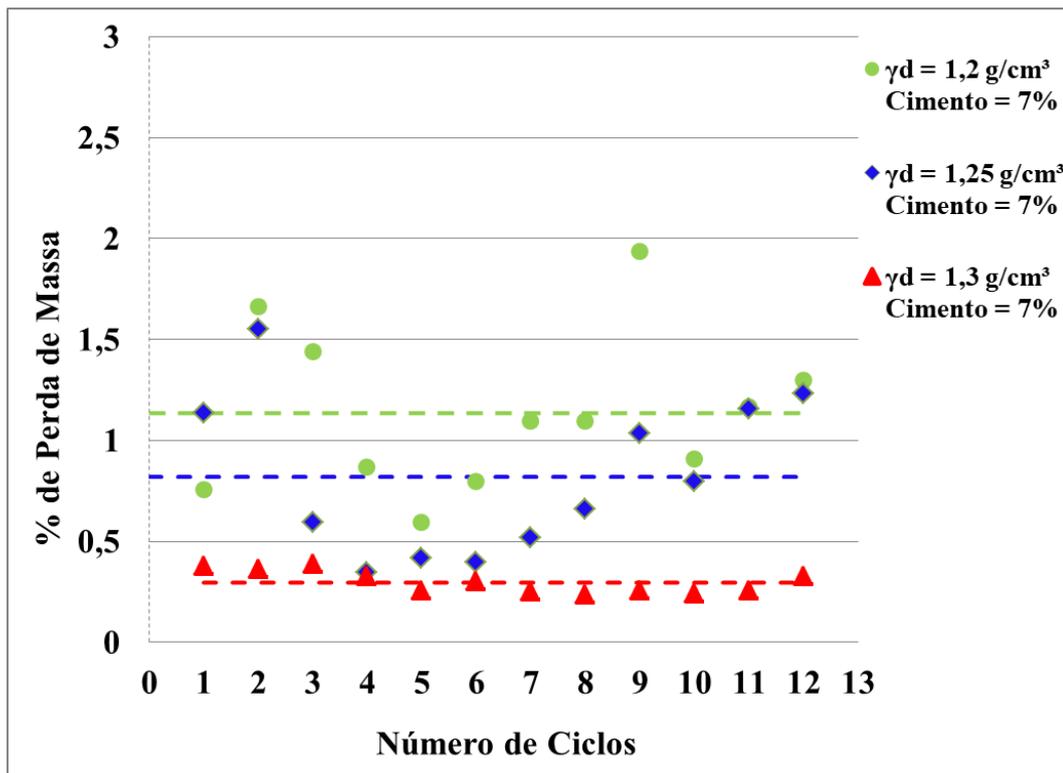
#### 4.5. Ensaio de Durabilidade

Para a realização do ensaio de durabilidade foram elaborados três corpos de prova considerando a condição mais suscetível à ação de intempéries, ou seja, com a adição da menor porcentagem de cimento (7%) e com variação do peso específico aparente seco ( $1,2 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,25 \text{ g/cm}^3$  e  $1,3 \text{ g/cm}^3$ ). Os dados referentes aos corpos de prova do ensaio de

durabilidade, bem como, as informações obtidas durante os ensaios são apresentados nas Tabelas D, E, F e G, do Anexo B deste trabalho.

A Figura 55 apresenta a porcentagem de perda de massa registrada em cada um dos ciclos do ensaio de durabilidade, para cada um dos corpos de prova avaliados.

Figura 55 – Variação da Perda de Massa em função do Número de Ciclos.



Fonte: Autora (2019).

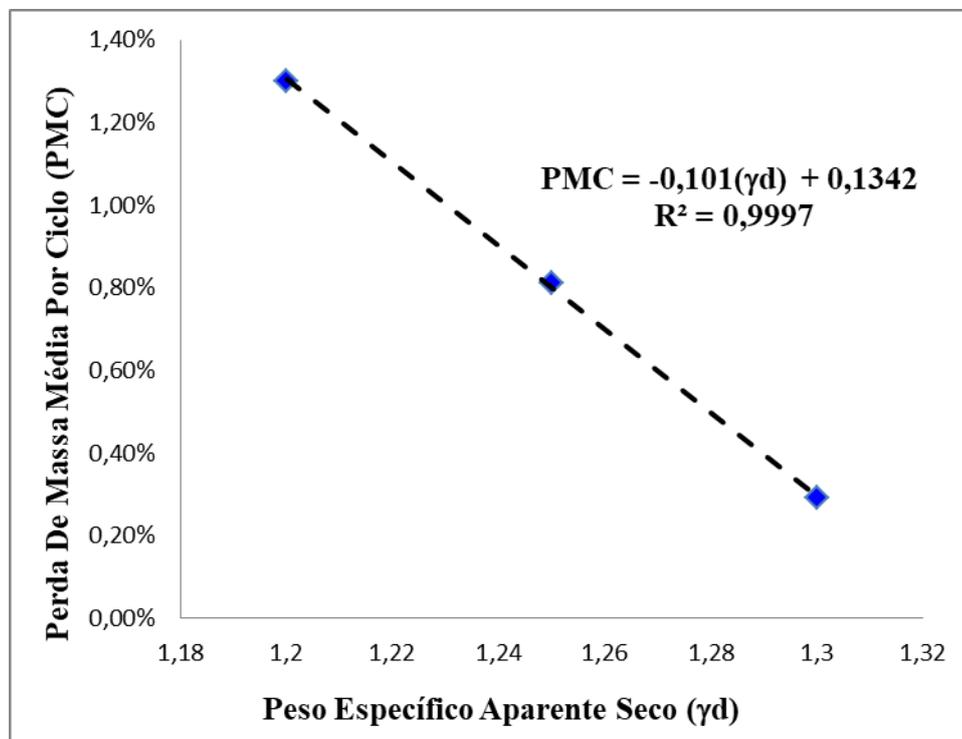
Para o corpo de prova com  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup> é possível observar valores mais altos de perda de massa de material por ciclo, em comparação aos outros corpos de prova, apresentando uma média de perda de massa de 1,3% de material por ciclo. Além disso, observa-se uma alta variabilidade nos valores de perda de material registrados em cada ciclo analisado para corpo de prova com  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup>. Este fato demonstra que quanto menor a densidade do corpo de prova, maior é a perda do material e, para o corpo de prova com  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup>, a inconstância dos valores de perda de massa por ciclos pode estar relacionada à fragilidade da mistura obtida com tais características físicas. Como também pela influência na etapa de escovação, a qual é realizada com um método manual de aplicação de força, resultando em uma grande variação dos resultados. Para os resultados obtidos por meio do ensaio no corpo de prova com  $\gamma_d$  de 1,25 g/cm<sup>3</sup>, ainda foram observadas variações entre os registros de perda de massa por ciclo, possivelmente também relacionadas com a fragilidade

desta mistura e pelo método de escovação. No entanto, o aumento da densidade elevou a média de perda de material por ciclo para 0,81%.

Por fim, para os resultados obtidos por meio do ensaio realizado no corpo de prova com  $\gamma_d$  de 1,3 g/cm<sup>3</sup>, observa-se uma maior constância na perda de material ao longo dos ciclos analisados, obtendo-se uma média de 0,29% de perda. Pode-se afirmar que o aumento da densidade do corpo de prova provocou uma redução do índice de vazios e uma melhor interação com o cimento, resultando numa mistura mais resistente à ação de intempéries.

Apesar da variabilidade observada nos registros de perda de massa dos corpos de prova com  $\gamma_d$  de 1,2 e 1,25 g/cm<sup>3</sup>, ao se plotar o valor médio de perda de massa definido por ciclo em função do  $\gamma_d$  de cada corpo de prova, obtém-se uma tendência quase linear ( $R^2=0,99$ ), conforme demonstra a Figura 56. Esta linearidade observada permite afirmar que os registros de perda de massa possuem uma relação diretamente proporcional à redução de  $\gamma_d$ , considerando-se o mesmo teor de cimento. A Figura 56 apresenta ainda um equacionamento que permite a estimativa de perda de material com a variação de  $\gamma_d$ , para misturas de rejeito com 7% de cimento em peso.

Figura 56 – Perda de massa por ciclo em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) do material.

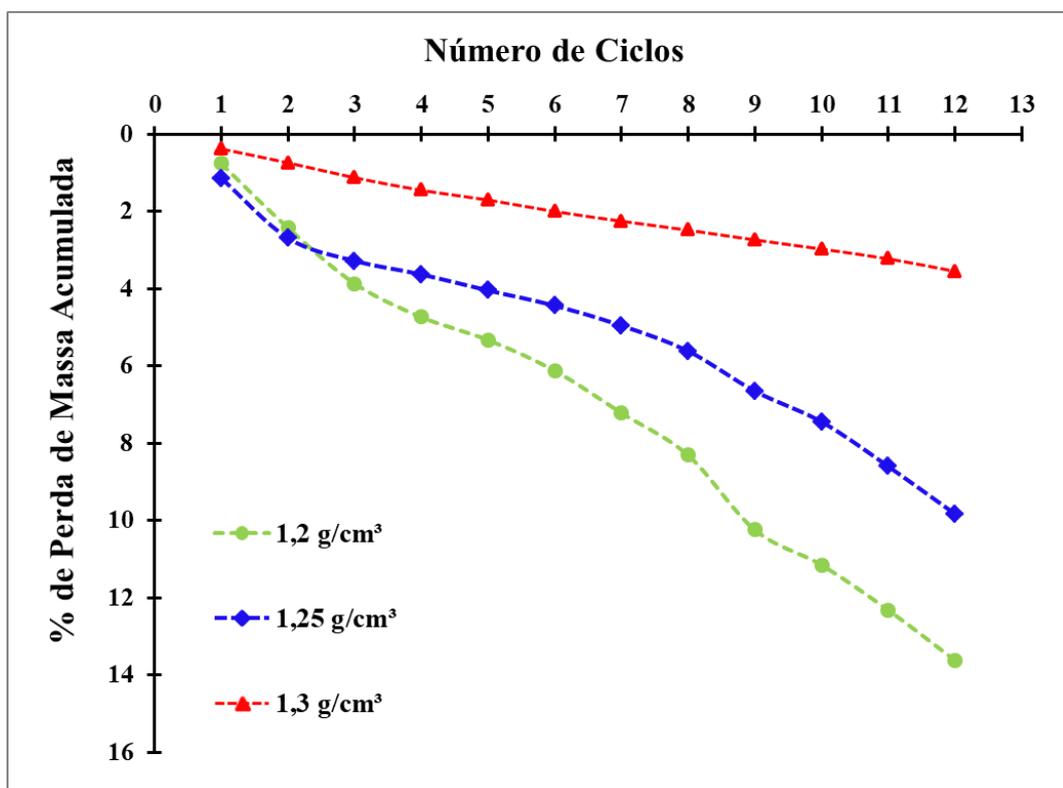


Fonte: Autora (2019).

A Figura 57 apresenta a perda de massa acumulada do material para cada um dos corpos de prova avaliados, em função do ciclo do ensaio de durabilidade.

Pode-se observar, que independente do valor do  $\gamma_d$  do corpo de prova avaliado, a porcentagem de perda de massa é crescente com os ciclos do ensaio. Por outro lado, observa-se que quanto maior o valor de  $\gamma_d$  do corpo de prova, menor será sua perda de massa acumulada, o que corrobora com o fato deste corpo de prova ser o que teve a menor média de perda de material por ciclo de ensaio.

Figura 57 – Variação da porcentagem de perda acumulada em função do número de ciclos.



Fonte: Autora (2019).

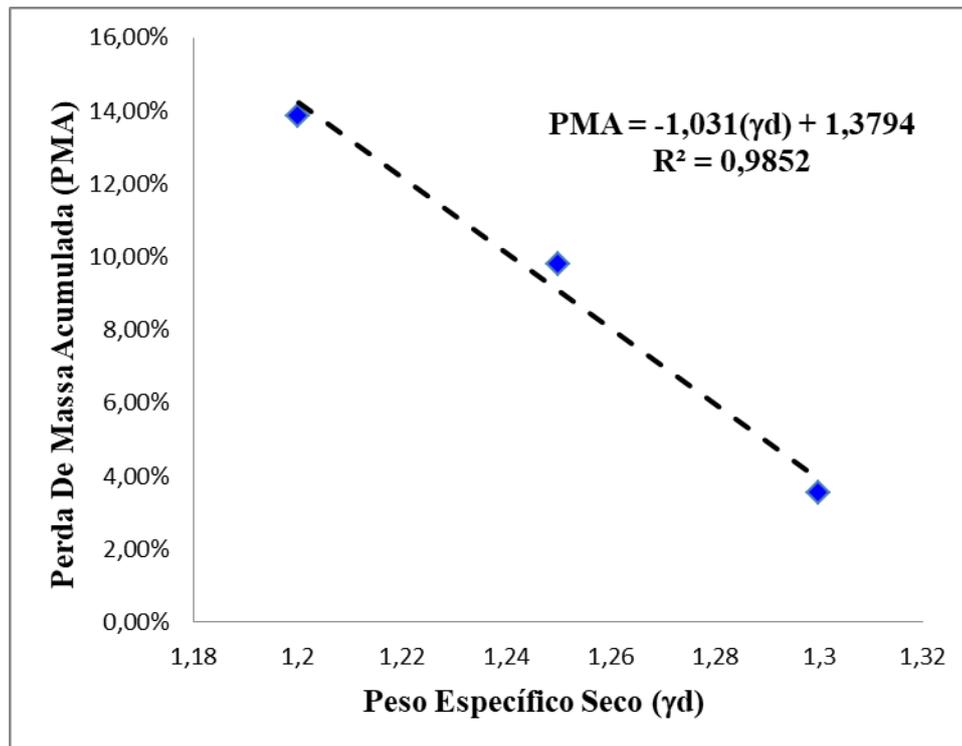
Em análise à Figura 57, verifica-se que no corpo de prova com  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup>, a porcentagem de perda de massa acumulada atingiu um valor de 13,6% no último ciclo, sendo este o maior valor registrado, em comparação aos demais corpos de prova avaliados.

Para o corpo de prova com  $\gamma_d$  de 1,25 g/cm<sup>3</sup>, é possível verificar uma similaridade de perda de massa acumulada nos dois primeiros ciclos, em comparação ao corpo de prova com  $\gamma_d$  de 1,2 g/cm<sup>3</sup>. A partir do terceiro ciclo o corpo de prova com  $\gamma_d$  apresentou menores perdas de massa acumulada, atingindo 9,8% de perda acumulada no último ciclo do ensaio.

Já para os resultados obtidos para o corpo de prova com  $\gamma_d$  de 1,3 g/cm<sup>3</sup>, observa-se a menor perda acumulada de material em relação aos demais corpos de prova estudados, chegando a 3,55% de perda acumulada no último ciclo de ensaio.

A Figura 58 apresenta a relação entre a perda de massa acumulada e os valores de  $\gamma_d$  dos corpos de prova ensaiados. Neste caso também se obtém uma tendência quase linear ( $R^2=0,985$ ) de variação entre as propriedades avaliadas. Esta condição indica que a perda de massa acumulada é diretamente proporcional à redução de  $\gamma_d$ , considerando-se o mesmo teor de cimento. Na Figura 58 também apresenta-se um equacionamento que permite a estimativa de perda de massa acumulada com a variação de  $\gamma_d$ , para misturas de rejeito com 7% de cimento em peso.

Figura 58 – Variação da porcentagem de perda acumulada em função do número de ciclos.

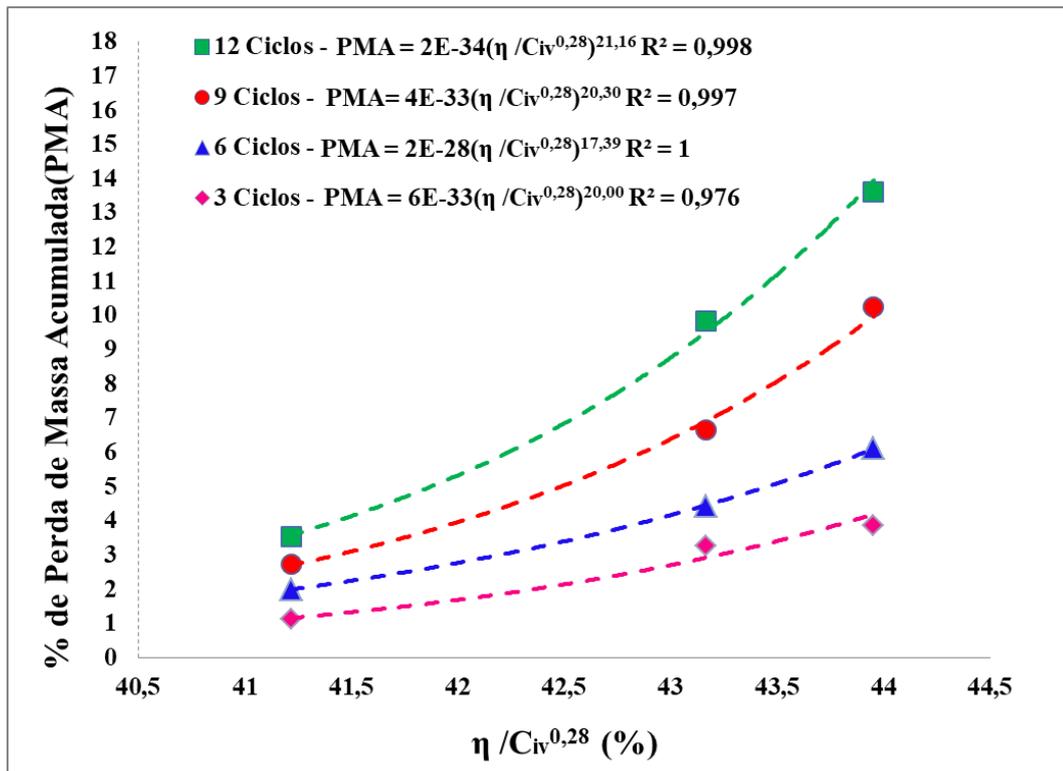


Fonte: Autora (2019).

A perda de massa acumulada também pode ser correlacionada com o índice  $\eta/Civ^{0,28}$ , conforme demonstra a Figura 59. Nesta Figura são correlacionadas as perdas de massa acumuladas com os valores de  $\eta /Civ^{0,28}$ , os quais variam para cada corpo de prova avaliado. Desta forma, são definidas as variações em função do ciclo avaliado. A critério de exemplificação foram selecionados os ciclos de número 3, 6, 9 e 12 para esta análise. Verifica-se que a perda de massa acumulada apresenta aumento exponencial de acordo com o

aumento de  $\eta / C_{iv}^{0,28}$ . Para cada um dos ciclos avaliados foi possível definir um equacionamento que permite a estimativa da perda de massa acumulada (PMA) em função de  $\eta / C_{iv}^{0,28}$  do corpo de prova. Estes equacionamentos são apresentados na Figura 59 e demonstram um ótimo nível de confiança, conforme se pode verificar pelos valores de  $R^2$  próximos à unidades.

Figura 59 – Variação da porcentagem de perda de massa acumulada em função da resistência a compressão da amostra.

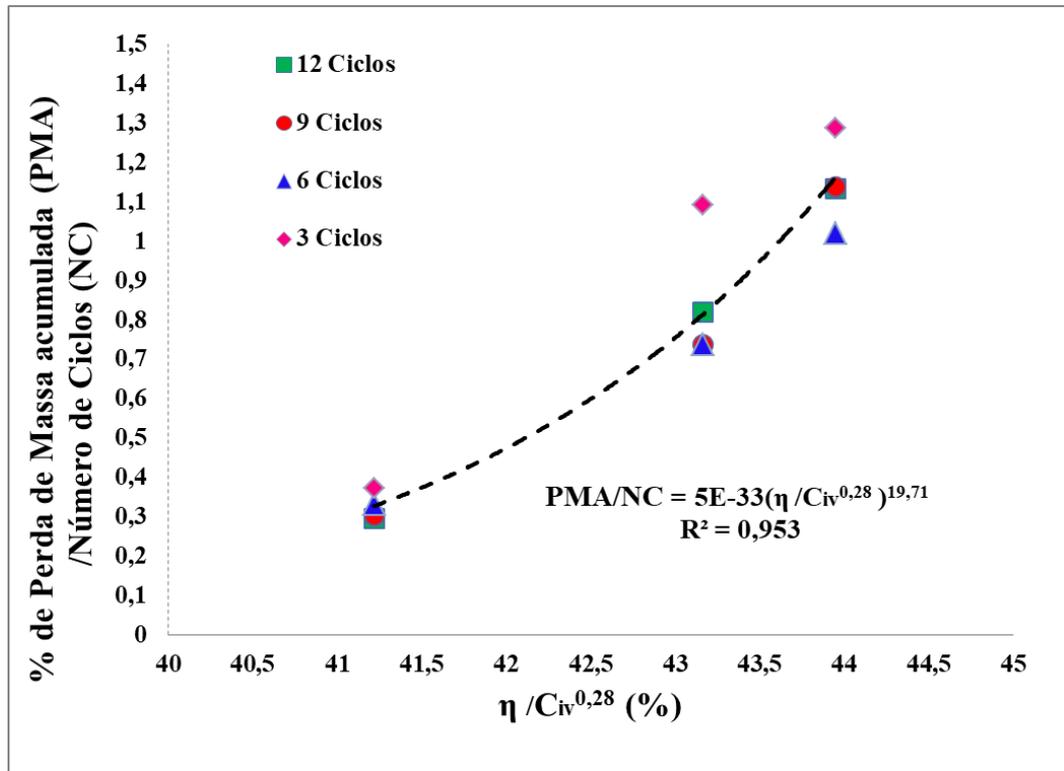


Fonte: Autora (2019).

Com o objetivo de apresentar um equacionamento válido para todos os ciclos do ensaio de durabilidade, realizou-se a normalização dos registros de perda de massa apresentados na Figura 59, Sendo assim, a Figura 60 apresenta a porcentagem de perda de massa acumulada para 12, 9, 6 e 3 ciclos, sendo estas quantidades divididas pelo número de ciclo correspondente, em função de  $\eta / C_{iv}^{0,28}$ . Por meio desta normalização é possível definir uma relação única entre a perda de massa acumulada e o  $\eta / C_{iv}^{0,28}$ , sendo a perda de massa acumulada também uma função exponencial de  $\eta / C_{iv}^{0,28}$ .

A equação apresentada na Figura 60 permite que se obtenha uma estimativa da perda de massa acumulada para qualquer ciclo do ensaio de durabilidade. Verifica-se, ainda, boa confiabilidade do equacionamento com valor de  $R^2 = 0,953$ .

Figura 60 – Variação da porcentagem de perda de massa acumulada normalizada pelo número de ciclos em função de  $\eta / C_{iv}^{0,28}$



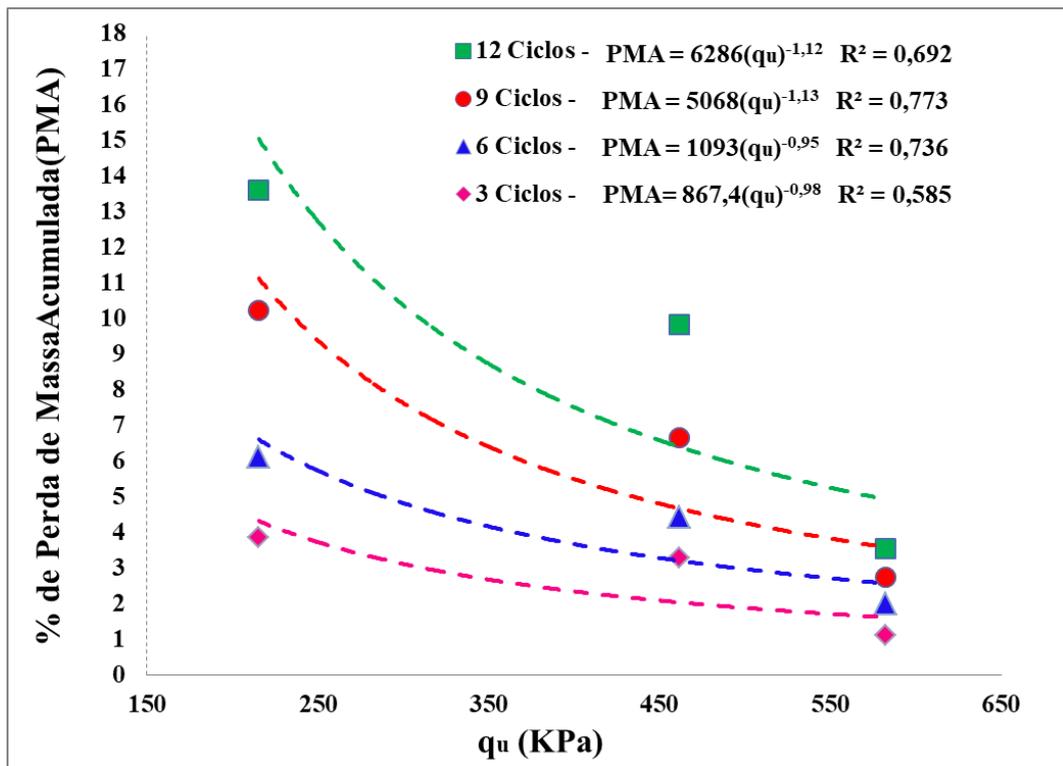
Fonte: Autora (2019).

#### 4.6. Relação Entre Resistência À Compressão Simples E Durabilidade

A análise das propriedades de resistência à compressão e durabilidade pode ser efetuada de forma conjunta.

A Figura 61 apresenta a porcentagem de perda de massa acumulada (PMA) em função da resistência à compressão ( $q_u$ ) do material, para diferentes ciclos do ensaio de durabilidade (3, 6, 9 e 12). Para cada um dos ciclos avaliados foi possível determinar um equacionamento para estimativa da perda de massa acumulada (PMA) em função da resistência à compressão. Verifica-se que o valor de PMA reduz exponencialmente com o aumento de  $q_u$ . As equações apresentadas apresentaram um grau de confiabilidade mediano com  $R^2$  variando de 0,58 a 0,77, sendo possível sua adoção para fins de estimativa de ordem de grandeza de perda de material em função da resistência à compressão destas misturas.

Figura 61 – Variação da perda de massa acumulada em função da resistência a compressão.



Fonte: Autora (2019).

## 5. CONCLUSÃO

Esse capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões pertinentes aos resultados obtidos dos ensaios realizados na pesquisa. Considerando os objetivos específicos e gerais propostos no início do estudo foram obtidas as conclusões a seguir.

Em relação à incorporação do agente cimentante, os resultados obtidos mostraram que houve ganhos significativos de resistência à compressão dos corpos de prova tratados com porcentagens de cimento a partir de 7%. No entanto, em comparação com dados apresentados pela literatura, como Foppa (2005), que encontrou resultados satisfatórios para teores na faixa de (1% a 7%), utilizando solo arenoso e cimento, a mistura de rejeito de mineração de bauxita e cimento na presente pesquisa apresentou necessidade de altas porcentagens de cimento (7%, 9% e 11%) para obter bons resultados de resistência.

Além disso, foi possível observar que a resistência à compressão aumenta em função do aumento das porcentagens de cimento. O peso específico aparente seco também apresenta influência nos valores de resistência, sendo que quanto maior o valor de  $\gamma_d$  maiores foram as resistências registradas.

Verificou-se, ainda, que para uma mesma porcentagem de cimento, quanto maior a porosidade do material menor a resistência à compressão do mesmo. Além disso, foi verificado que a resistência à compressão varia exponencialmente com os valores de  $\eta / \text{Civ}^{0,28}$  sendo que quanto menor este índice maior foi a resistência registrada. Foi possível apresentar equacionamentos para a estimativa da resistência em função da porcentagem e teor volumétrico de cimento, porosidade e ambas as propriedades agindo em conjunto através do índice  $\eta / \text{Civ}^{0,28}$ .

Ainda no ensaio de resistência à compressão, avaliou-se o comportamento tensão *versus* deformação dos corpos de prova, sendo possível verificar que para valores de porcentagem de cimento de 7%, a carga máxima foi obtida com o ganho de deformações significativas. Já para porcentagens de cimento de 9 e 11%, o comportamento mostrou-se mais frágil, com ganho de resistência com menos deformação, sendo este comportamento também observado por meio da análise do modo de ruptura destes corpos de prova.

Em relação aos ensaios de durabilidade, verificou-se que a perda de massa acumulada dos corpos de prova, independente do ciclo analisado, foi maior para as menores porcentagens de cimento e também para os maiores valores de  $\eta / \text{Civ}^{0,28}$ . Para este ensaio também foi possível apresentar um equacionamento para estimativa do valor de perda de massa em função do teor de cimento e porosidade dos corpos de prova.

Afinal avaliou-se também a relação entre os ensaios de durabilidade e resistência à compressão. Sendo assim, identificou-se a perda de massa acumulada, independentemente do ciclo de ensaio reduz em função do aumento da resistência. Neste caso um equacionamento também foi proposto para estimativa da perda de massa acumulada em função dos valores de  $qu$ , para ciclos de ensaio de durabilidade específicos.

De modo geral, é possível concluir com este trabalho que para a mistura de rejeito de mineração de bauxita e cimento foi verificado que apenas para valores a partir de 7% de porcentagem de cimento em massa, foi possível a realização dos ensaios propostos, chegando-se a valores de resistência à compressão. Para questões de durabilidade do material, avaliou-se apenas a condição mais crítica, ou seja, os corpos de prova com inserção de menor quantidade de cimento (7% em massa), sendo verificado que esta variável é totalmente dependente da densidade do corpo de prova e da porosidade, sendo registradas as maiores perdas para menores densidades e maiores porosidades.

Para todos os casos foi possível se determinar um equacionamento com confiabilidade ótima à mediana para estimativa de propriedades para diferentes condições de ensaio daquelas realizadas neste trabalho. Esta condição permitirá que possíveis aplicações do rejeito, estudado no presente trabalho, tratado com cimento, possam ter suas dosagens definidas por meio das propriedades de resistência e durabilidade estimadas por meio das formulações, sem a execução de novos ensaios.

### **5.1. Sugestões Para Trabalhos Futuros**

Para futuros trabalhos que deem continuidade a este estudo foram sugeridos as seguintes propostas:

- Realizar ensaios com valores de peso específico aparente seco superiores, abrangendo maiores variações de porosidade do material;
- Realizar ensaios de durabilidade para as demais misturas;
- Obter maior gama de resultados para aumentar a confiabilidade dos equacionamentos considerados de confiabilidade mediana;
- Realizar ensaios com outros rejeitos;

## REFERÊNCIAS

ABAL. **Bauxita no Brasil – Mineração Responsável e Competitividade**. 2017. Disponível em: <[http://www.abal.org.br/downloads/ABAL\\_Relatorio\\_Bauxita\\_2017\\_1.pdf?fbclid=IwAR0\\_W1MjWhyJ2F-On47zBZtcjsouVvMg3hp0lGbYZf-OYXbISybawrB1LE](http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf?fbclid=IwAR0_W1MjWhyJ2F-On47zBZtcjsouVvMg3hp0lGbYZf-OYXbISybawrB1LE)>

AGUIAR, O. P. D. **Contribuição ao Estudo do Índice de Segurança de Barragens – ISB**. 2014 Dissertação. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 559: Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures**. Philadelphia, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 5102: Standard test methods Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil – Lime Mixtures**. Philadelphia, 2009.

ANA - Agência Nacional de Águas. 2011. **Relatório de Segurança de Barragens – Relatório** Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2011>>

ANA - Agência Nacional de Águas. 2015. **Relatório de Segurança de Barragens – Relatório** Disponível em: <[http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2015-1?fbclid=IwAR0ClqtAHkMExeEyXmGhArlIZjLqupOTDQXALi6K-BSy55f\\_kg05vRf4XCy](http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2015-1?fbclid=IwAR0ClqtAHkMExeEyXmGhArlIZjLqupOTDQXALi6K-BSy55f_kg05vRf4XCy)>

ANA - Agência Nacional de Águas. 2016. **Relatório de Segurança de Barragens – Relatório** Disponível em: <[http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/rsb-2016/relatorio-de-seguranca-de-barragens-2016.pdf?fbclid=IwAR39spuvsW\\_kBnsht-5MhzyA95HWkI1z31oBgTsLFJdm2gnOVtrpfXP9-tQ](http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/rsb-2016/relatorio-de-seguranca-de-barragens-2016.pdf?fbclid=IwAR39spuvsW_kBnsht-5MhzyA95HWkI1z31oBgTsLFJdm2gnOVtrpfXP9-tQ)>

ANA - Agência Nacional de Águas. 2016. **Relatório de Segurança de Barragens – Relatório** Disponível em: <[http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2017/rsb-2017-versao-enviada-ao-cnrh.pdf?fbclid=IwAR2fcjT4cSexmog\\_YtXWMxZ5zTBR0y2ORLMIEXFbt5bn1L0x1129V3cDd4](http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2017/rsb-2017-versao-enviada-ao-cnrh.pdf?fbclid=IwAR2fcjT4cSexmog_YtXWMxZ5zTBR0y2ORLMIEXFbt5bn1L0x1129V3cDd4)>

ANJOS, F. V. e SILVA, J. B. 1983. **As usinas de produção de alumínio da ALCAN no Brasil – processo Bayer para produção de alumina e os processos eletrolíticos para a produção de alumínio**. In: As usinas brasileiras de metalurgia extrativa dos metais não-ferrosos, ABM, São Paulo.

ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T.; TOLEDO, S. P., KIYOHARA, P.K. **Bauxita e seu resíduo, Caracterização e estudo por microscopia eletrônica**. 2012.

AQUINO, T. F. **Beneficiamento químico da bauxita de Santa Catarina**. 2007. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2007.

ARENARE, D. S. **Caracterização de amostras de bauxita visando a aplicação de métodos de concentração gravítica**. 2008. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solopreparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. São Paulo: ABNT, 1986.

\_\_\_\_\_. NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. São Paulo: ABNT, 2000.

\_\_\_\_\_. NBR 10004: Resíduos Sólidos- Classificação. São Paulo: ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 6459: Determinação do limite de liquidez. São Paulo: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. NBR 6502: Rochas e solos. São Paulo: ABNT, 1995.

\_\_\_\_\_. NBR 6508: Determinação da massa específica. São Paulo: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade. São Paulo: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 7181: Análise granulométrica. São Paulo: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. NBR 5738: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. São Paulo: ABNT, 2015.

BAPTISTA, C. de F. Nogueira. **Pavimentação**. Editora Globo. Tomo 1 e 2. 1976.

BEDIN, J. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. 2010. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BEDIN, J. **Intepretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BERMANN, C. **Exportação brasileira de produtos intensivos em energia: implicações sociais e ambientais**. Fórum Brasileiro de ONG's e Movimentos Sociais para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, Rede Brasileira pela Integração dos Povos (REBRIP), 2002.

BRAGA, M. B. C. ; BRITO, J.; VEIGA, R.. **Incorporation of fine concrete aggregates in mortars**. Construction and Building Materials 36 (2012) 960 – 968

BRASIL. **Relatório de Segurança de Barragens, Lei 12.332**. Diário de Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 20 de setembro de 2018. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-)

2010/2010/lei/112334.htm?fbclid=IwAR0ClqtAHkMExeEyXmGhArlIZjLqupOTDQXALi6K-BSy55f\_kg05vRf4XCY > Acessado em junho de 2019.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 02 de agosto de 2018. Disponível em:<[http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636&fbclid=IwAR2fcjT4cSexmog\\_YtXWMxZ5zTBR0y2ORLMIEXEf5bn1L0x1129V3cDd4](http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636&fbclid=IwAR2fcjT4cSexmog_YtXWMxZ5zTBR0y2ORLMIEXEf5bn1L0x1129V3cDd4)> Acessado em junho de 2019.

BRITO, J.; SALKIA, N. **Recycled Aggregate Concrete, Green Energy and Technology**. DOI: 10.1007/978-1-4471-4540-0\_2, Springer-Verlag London 2013.

BRUNORI, C., CREMISINI, C., MASSANISSO, P., PINTO, V., TORRICELLI, L. **Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility**, Journal of Hazardous Materials, v. 117, n.1, pp. 55-63, 2005.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.

CARVALHO, L. R. **Proposta de Estudo de Processos Construtivos Industrializados do ponto de vista ambiental**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Engenharia Civil – Escola Politécnica- Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS. Relatório emergencial a Brumadinho/MG após rompimento da barragem da Vale S/A. 2019. Disponível: .

CONSOLI, N.C; TOMASI, L.F. **The impact of dry unit weight and cement content on the durability of sand-cement blends**. 2017. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 2017.

CONSOLI, N.C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K.S. **Key parameters for strength control of artificially cemented soils**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 10.1061/(ASCE) 1090-0241(2007)133:2(197), 197-205.2007

CONSOLI, N. C.; NIERWINSKI, H. P.; SILVA, A. P.; SOSNOSKI, J. **Durability and strength of fiber-reinforced compacted gold tailings-cement blends**. *Journal of Geotextiles and Geomembranes* 45 98-102.2017.

CONSOLI, N. C.; NIERWINSKI, H. P.; SILVA, A. P.; SOSNOSKI, J. **Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes**. 2018.

CONSTANTINO, Vera R. Leopoldo; et al. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. *Química Nova*. v. 25, n. 3, 2002

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 093: Determinação da densidade real**. São Paulo: DNER, 1994.

DIAS, D. R. **Resistência à compressão não confinada de misturas de solo-cimento visando à aplicação do sistema de estabilização Dry-Mix.** 2012. . Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral. 2014. **Manual de Fiscalização, assunto: barragens de mineração.**

Disponível em:

<<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/manuais/manual-de-parcelamentos-dos-creditos-do-dnpm>>

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de risco.** 2008. Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.

ESPÓSITO T. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico.** 2000. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

EUROSOILSTAB. **Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design guide soft soil stabilization.** CT97-0351, EC Project No. BE 96-3177, Industrial & Materials Technologies Programme (BriteEuRam III), European Commission, 94 p, 2001.

FEAM/MG – Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2014. **Inventário de barragens do Estado de Minas Gerais.**

Disponível em:

<[http://www.feam.br/images/stories/2015/DECLARACOES\\_AMBIENTAIS/GESTAO\\_DE\\_BARRAGENS/correo\\_inventrio%20de%20barragens\\_2014\\_final.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2015/DECLARACOES_AMBIENTAIS/GESTAO_DE_BARRAGENS/correo_inventrio%20de%20barragens_2014_final.pdf)>

FLOSS, M. F. **Parâmetros de controle da resistência e rigidez de solos granulares artificialmente cimentados.** 2012. Tese (Doutorado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

G1. **Rompimento de barragem deixa 30% de cidade desalojada,** 2007. Disponível em: <http://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,,AA1417258-5598,00.html>. Acessado em: 10 abr. 2019.

G1. **Laudo aponta problemas no sistema de drenagem na barragem da Vale em Brumadinho.** 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/02/05/fotos-mostram-defeitos-na-drenagem-da-barragem-da-vale-em-brumadinho-aponta-professor.ghtml>> Acessado em: 15 abr. 2019.

G1. **Nenhuma lição aprendida pelo poder público, diz procurador após dois anos de tragédia de Mariana,** 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/nenhuma-licao-aprendida-pelo-poder-publico-diz-procurador-apos-dois-anos-da-tragedia-de-mariana.ghtml>> Acessado em: 17 abr. 2019.

GEOTÉCNICA, Lagetec. **Determinação Da Densidade Real Em Solo**. Disponível em: <<http://www.lagetec.ufc.br/wp-content/uploads/2017/07/Determina%C3%A7%C3%A3o-da-densidade-real-em-solos1.pdf>> Acesso em 05 de abril de 2019.

GÓIS, C. C., LIMA, R. M. F., MELO, A. C. **Sedimentação de resíduo Bayer utilizando floculantes hidroxamatos e poliacrilamida**. Revista Escola de Minas, v. 56, n.2, pp. 119-122, Ouro Preto, Minas Gerais, Abril/Junho, 2003.

HABASHI, F. **A short history of hydrometallurgy**. Hydrometallurgy, n.79, pp. 15-22, 2005.  
HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCOTT, S. C. **The surfasse chemistry of Bayer process solids: a review**. Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, n. 146, pp.359-374, 1999.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 2015. **Laudo Técnico Preliminar**.

Disponível em:

<[https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo\\_tecnico\\_preliminar\\_ibama.pdf?fbclid=IwAR3tWxjPGrKnWao5-vtx4iS3g6CyCukjU56Dwly1D5XsnewEVF59rwkzXXk](https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf?fbclid=IwAR3tWxjPGrKnWao5-vtx4iS3g6CyCukjU56Dwly1D5XsnewEVF59rwkzXXk)>

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração**. 2016. Relatório disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>

INGLES, O. G; METCALF, J. B. **Soil stabilization: Principle and practice**. Melbourne: Butterworths, 1972.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2016. **Rejeito de Mineração**.

Disponível em:

<[https://www.ipt.br/centros\\_tecnologicos/CTMM/noticias/1043-rejeitos\\_de\\_mineracao.htm?fbclid=IwAR3-8UEdU\\_rDFoyLQ6eGqJCKYJTB445k2cmDcC5YeCDIzPbvWQCkpIXWv1A](https://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CTMM/noticias/1043-rejeitos_de_mineracao.htm?fbclid=IwAR3-8UEdU_rDFoyLQ6eGqJCKYJTB445k2cmDcC5YeCDIzPbvWQCkpIXWv1A)> Acessado em 22 de junho de 2019.

KANAZAWA, N. M. **Durabilidade, rigidez e análise do ciclo de vida de um solo dispersivo estabilizado com cal**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KIRKPATRICK, D.B. **Red mud product development**. The Minerals, Metals & Materials Society, 1996

KIRK-OTHMER. **Encyclopedia of Chemical Technology**, 3. Ed, New York: John Wiley & Sons, v. 2, 1978.

LANARCH, W. J. **Relantionship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strenght of Soil-cemente Mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskire and Co., vol 55, n 648, p 903-905, 1960.

LEON, H. B. **O índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/Civ$ ) como um parâmetro de estado para areias cimentadas**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LING, T.; POON, C.. **Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with diferente particle sizes**. Materials and Desing 32 (2011) 2675-2684.

LUZ, A. B.; LINS, F.A.F. **Rochas & Minerais Industriais: usos específicos**. Segunda Edição. Rio de Jnaeiro: CETEM/MCT, 2008.

MACEDO, D. **Estratégias para a sustentabilidade da mineração de rochas ornamentais no noroeste do estado do espírito santo**. 2016. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MACHADO, W. G. F. **Monitoramento de Barragens de contenção de rejeitos da Mineração. 2007**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas e Petróleo, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MATEOS, M. 1961. **Physical and Mineralogical factors in stabilization of Iowa soils**. Ph.D Thesis, Iowa State University, 1961.

McCONCHIE, D., CLARK, M., DAVIES-McCONCHIE, F. **New strategies for the management of bauxite refonary residues (red mud)**. In: Proceedings of the 6th international alumina quality workshop, Brisbane, Australia, pp. 327-332, 2002.

MIQUELITO, A. C.; QUELHAS, L. G. **Ações relacionadas aos acidentes ambientais: estudo de caso do acidente da Indústria Cataguases de Papel e Celulose/ MG**. 2003.

MME. Ministério de Minas e Energia. 2013. **Beneficiamento de minérios**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/177708/Beneficiamento+de+Min%C3%A9rios/0b762ba9-35a6-4e73-9e7b-6d1e957e5d8f?version=1.0>>

MORGENSTERN, N. R. (Chair); VICK, S. G; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. **Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam**. In: FUNDÃO TAILINGS DAM REVIEW PANEL. Disponível em: <http://fundaoinvestigation.com/the-report/>. Acesso em: 21 maio 2019.

NIERWINSKI, H. P. **Potencial de liquefação de resíduos de mineração estimado através de ensaios de campo**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

NIERWINSKI, H. P.; MARTINS, A. C.; SCHNAID, F. **Análise de Influência do Defloculante na Determinação de Curvas Granulométricas de Rejeitos de Mineração**. 2018.

NOVAES, J. F. **Misturas cinza volante – cal de carbureto: durabilidade, resistência à tração e compressão**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa

de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ORTEGA, F. S.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A.; SEPULVEDA, P. A. **Defloculação e Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina Estabilizadas com Dispersantes Poliacrílicos.**1997.

PETRY, N. S. **Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassa de cimento Portland branco.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Sexta edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. (LTC), Rio de Janeiro 1988.

PRADHAN, J., DAS, S. N., DAS, J., RAO, S. B., THAKUR, R.S. Characterization of Indian red muds and **recovery of their metal values.** Light Metals, pp. 87-92, 1996.

PRIETTO, P. D. M. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Artificialmente Cimentado.** 1996. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RAFAEL , H. M. A. M. ,2012. **Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito.** Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/20720/20720\\_3.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/20720/20720_3.PDF)>

ROBERTSON, P.K. **Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT.**2010. Proc. of 2nd International Symposium on the CPT, TC102-16 ISSMGE, California,2010.

ROSA, D. A. **Validação da relação vazios/cimento na estimativa da resistência à compressão simples do Caulim artificialmente cimentado.** 2010. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SANT'ANA FILHO, J. N. S., 2013. **Estudo de Reaproveitamento dos resíduos das Barragens de Minério de Ferro para Fabricação de Blocos Intertravados de Uso em Pátios Industriais e Alto Tráfego.** 2013.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C; DUTRA, A. J. B. **Bauxita. In Minerais e Rochas Industriais.** CETEM, 2005 p. 279-304.

SAMPAIO, J. A.; NEVES, C. H. B.. **Bauxita, MSL Minerais S. A.** In Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil. CETEM, 2001, pp. 307-314.1

SANTOS, P. S. - **Ciência e Tecnologia das Argilas** - vol 1, 2a ed., Ed. Edgard Blücher Ltda. 1989.

SÁ, P. B. **Percepção da população acerca dos impactos socioambientais do acidente da mineração Pomba-Cataguases no município de Laje do Muriaé.** 2007. Monografia (Curso Ciências Sociais), Universidade Estadual do Norte Fluminense – Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes - RJ, 2007.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. 2007. Revista Matéria, v. 12, n. 2, pp. 322-338, 2007.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. Editora PINI, Vol. 1. 1997.

SEVRYUKOV, N.; KUZMIN, B. e CHELISHCHEV, Y. (1950). General Metallurgy. Peace Publishers, Moscow, 545p.

SILVA, C. L.; SOUZA, H. R.; SOUZA, J. P.; SILVA, M. L. C.; GOMES, W. F. **Pesquisa Experimental**. 2008. Universidade federal do Pará.

SOUZA PINTO, C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Terceira edição, Oficina de Textos, São Paulo, 2006.

TEBECHRANI NETO, A. **Melhoramento de um solo sedimentar com baixa capacidade de suporte do litoral norte de santa catarina**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel), Curso Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.

TOMASI, L. F. **Comportamento mecânico de resíduo de mineração estabilizado com cimento**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

TSCHIEDEL, A. F. **Avaliação de Incerteza em Estudos de Rompimento de Barragens**. 2017. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

VALE. **Entenda o que são as barragens de rejeitos**. 2016. Disponível em: <<http://www.vale.com/samarco/PT/Paginas/entenda-barragens-rejeito.aspx>>

VASCONCELLOS, L.; MACHADO, T.; AZZEZ, D. G. **Incidentes e Acidentes em barragens**. 7º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade. Rio de Janeiro, 2018.

VEJA. **Tragédia em Brumadinho não é acidente**. 2019. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/brasil/tragedia-de-brumadinho-nao-e-acidente-afirma-procuradoria/>> Acessado em: 05 de maio 2019.

VICK, S.G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. John Wiley & Sons, Inc.1983.

VIDAL, M. **Revegetação de Área de Caulim na Zona da Mata, em Minas Gerais: Um Estudo de Caso, Universidade Federal de Viçosa**, 2001. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2001.

WAGENER, F. M.; CRAIG, H. J.; BLIGHT, G.; McPHAIL, G.; WILLIAMS, A. A. B.; STRYDOM, J. H. **The Merriespruit tailings dam failure – a review**. In: Proceedings tailings and mine waste, Colorado: Fort Collins, 1997. P. 925-952.

WERK, S. M. S. **Estudo da Influência dos Métodos de compactação no comportamento resiliente de solos**. 2000. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

WILLS, B. A., **Mineral processing Technology: na introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**, 6 ed., Butterworth Heinemann, 1997.

WINTER, D. **Resistência, rigidez e durabilidade de solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis**. 2018. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

WINTER, D.; RILHO, A. S.; CONSOLI, B. S.; CONSOLI, N. C. **A prompt procedure for prediction of strenght in artificially cemented sof soils**. Journal of Geo-Engineering Sciences. 1, 95-100, 2014.

ZAMPIERI, L. Q. **Comportamento mecânico de um solo mole orgânico cimentado com aglomerantes variados**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

WAO – World Aluminium Organization. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org>> Acessado em 11 de maio de 2019.

WANG, S., BOYJOO, Y. CHOUEIB, A., ZHU, Z. H. **Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud**. Water Research, n 39, pp. 129-138, 2005.

## ANEXO A

Tabela A – Dados de Todos os Corpos de Prova elaborados para o Ensaio de Resistência a Compressão Simples.

Corpo de Prova	Peso (g)	Diâmetro médio (mm)	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Vt (cm <sup>3</sup> )
1	316,15	0,05064	0,00201408	100,78	204,8523402
2	317,79	0,051166667	0,00205619	99,8	205,208182
3	315,61	0,05107	0,00204843	99,1	202,9996324
4	328,98	0,05121	0,00205968	98,21	202,2810243
5	331,45	0,051596667	0,0020909	100,1266667	209,3548038
6	331,4	0,051	0,00204282	101,23	206,7947317
7	343,97	0,051083333	0,0020495	100,523	206,0220857
8	345,01	0,051333333	0,00206961	100,69	208,3891719
9	344,76	0,051466667	0,00208038	101	210,1180384
10	318,02	0,05153	0,0020855	100,5166667	209,6274949
11	319,02	0,051096667	0,00205057	100,03	205,118716
12	319,19	0,051403333	0,00207526	100,8066667	209,2000098
13	331,98	0,051626667	0,00209333	100,57	210,5263699
14	332,23	0,05144	0,00207822	100,8066667	209,4985665
15	332,65	0,051536667	0,00208604	101,1533333	211,0098511
16	344,03	0,051166667	0,00205619	101,4633333	208,6283184
17	345,36	0,0518	0,00210741	99,48	209,6453227
18	345,3	0,051336667	0,00206988	101,7433333	210,5965128
19	315,87	0,0513	0,00206692	100,98	208,7180353
20	319,04	0,051183333	0,00205753	101,1466667	208,1127023
21	318,8	0,051383333	0,00207365	101,4733333	210,4196806
22	331,93	0,051353333	0,00207122	101,2566667	209,7252812
23	332,43	0,051526667	0,00208523	100,63	209,8367014
24	345,15	0,051236667	0,00206182	101,4566667	209,185803
25	344,58	0,05123	0,00206129	100,7666667	207,7090816
26	341,68	0,05047	0,00200058	100,64	201,3386345
27	340,7	0,05166	0,00209604	99,79	209,1634072

Fonte: Autora (2019).

Tabela B – Dados de Todos os Corpos de Prova elaborados para o Ensaio de Resistência a Compressão Simples.

Corpo de Prova	Wt(g)	Ws(g)	Ws (rejeito)	Ws(ci)	Ww(g)	Wt(g)
1	316,15	248,4222371	232,170315	16,25192205	67,72776291	316,15
2	317,79	242,5848373	226,7148012	15,87003608	75,2051627	317,79
3	315,61	240,9207354	225,1595658	15,7611696	74,68926461	315,61
4	328,98	252,9526495	236,4043453	16,54830417	76,02735052	328,98
5	331,45	255,5793157	238,8591735	16,72014215	75,87068431	331,45
6	331,4	254,813387	238,1433523	16,67003466	76,58661305	331,4
7	343,97	265,6572168	248,2777727	17,37944409	78,31278319	343,97
8	345,01	263,8755342	246,6126488	17,26288541	81,13446583	345,01
9	344,76	265,6384874	248,2602686	17,3782188	79,12151256	344,76
10	318,02	242,7556402	222,7115965	20,04404368	75,26435982	318,02
11	319,02	245,3397052	225,0822983	20,25740685	73,68029484	319,02
12	319,19	244,7999743	224,5871324	20,21284191	74,39002573	319,19
13	331,98	251,6679048	230,8879861	20,77991875	80,31209515	331,98
14	332,23	252,8878896	232,0072382	20,88065144	79,34211035	332,23
15	332,65	254,2997027	233,3024795	20,99722316	78,35029734	332,65
16	344,03	263,6153252	241,8489222	21,76640299	80,41467484	344,03
17	345,36	263,7996945	242,0180684	21,78162615	81,56030549	345,36
18	345,3	263,7647619	241,9860201	21,77874181	81,53523814	345,3
19	315,87	241,1446685	217,2474491	23,89721941	74,72533145	315,87
20	319,04	242,7222461	218,6686902	24,05355592	76,31775386	319,04
21	318,8	242,2098044	218,207031	24,00277341	76,59019561	318,8
22	331,93	252,3503369	227,3426459	25,00769104	79,5796631	331,93
23	332,43	252,6766143	227,6365895	25,04002485	79,75338565	332,43
24	345,15	264,3222884	238,1281877	26,19410065	80,82771162	345,15
25	344,58	262,831014	236,7846973	26,0463167	81,74898599	344,58
26	341,68	260,6990714	234,8640283	25,83504311	80,98092862	341,68
27	340,7	259,9513393	234,1903958	25,76094354	80,74866067	340,7

Fonte: Autora (2019).

Tabela C – Dados de Todos os Corpos de Prova elaborados para o Ensaio de Resistência a Compressão Simples.

Corpo de Prova	Vs Rejeito (cm <sup>3</sup> )	Vs (ci)	Vs (total)	V (vv)	e	S(%)	η (%)	Civ (%)	η /Civ (%)	η /Civ <sup>0,28</sup> (%)
1	80,69875392	5,490514	86,18926813	118,663072	1,376773172	57,0756864	57,92614913	2,68023016	21,61237866	43,95279251
2	78,80250303	5,361499	84,16400171	121,04418	1,438194214	62,1303416	58,98603999	2,612711942	22,57655697	45,07789343
3	78,26192763	5,324719	83,58664709	119,412985	1,428613176	62,5470207	58,82423722	2,623019262	22,42615526	44,90470938
4	82,17043633	5,590643	87,76107963	114,519945	1,304905832	66,3878687	56,61427959	2,763800174	20,48421594	42,58965541
5	83,02369605	5,648697	88,67239272	120,682411	1,360991932	62,8680548	57,64492092	2,698145238	21,36464713	43,65789149
6	82,77488783	5,631768	88,4066563	118,388075	1,339130789	64,6911548	57,2490771	2,723361674	21,02147417	43,24530853
7	86,29745315	5,871434	92,16888697	113,853199	1,235267154	68,7839991	55,26261825	2,849905045	19,39103843	41,21724388
8	85,71868223	5,832056	91,55073811	116,838434	1,276215093	69,4415897	56,06742074	2,798636719	20,03383303	42,03059615
9	86,29136901	5,87102	92,16238887	117,95565	1,279867536	67,0773404	56,13780255	2,794153187	20,09116852	42,10225422
10	77,41105196	6,771636	84,18268834	125,444807	1,490149685	59,9979879	59,84177152	3,230318802	18,52503582	43,09389348
11	78,23507067	6,843719	85,0787892	120,039927	1,4109266	61,3798232	58,52217151	3,336467127	17,54016128	41,76381031
12	78,06295876	6,828663	84,89162157	124,308388	1,464318692	59,8431263	59,4208329	3,264179009	18,20391367	42,66600933
13	80,25303653	7,020243	87,27327935	123,253091	1,412266062	65,1603094	58,54520296	3,334614483	17,55681302	41,78674462
14	80,64207098	7,054274	87,69634512	121,802221	1,388908753	65,1401177	58,13988296	3,367218332	17,26644287	41,38454603
15	81,0922765	7,093656	88,18593297	122,823918	1,392783565	63,790749	58,20767016	3,361765545	17,31461322	41,45160378
16	84,0628857	7,353515	91,41640023	117,211918	1,282176041	68,6062272	56,18217079	3,524696256	15,93957797	39,48248149
17	84,12167826	7,358657	91,48033575	118,164987	1,291698221	69,0223962	56,36423719	3,510050875	16,05795448	39,6566367
18	84,11053878	7,357683	91,46822182	119,128291	1,302400863	68,4432199	56,56707673	3,493734509	16,1910061	39,8513065
19	75,51180019	8,073385	83,58518512	125,13285	1,497069725	59,7167981	59,95306059	3,868082087	15,4994282	41,04994388
20	76,00580126	8,126201	84,13200258	123,9807	1,473644938	61,5561568	59,57382627	3,904711839	15,25690722	40,68277583
21	75,84533576	8,109045	83,95438083	126,4653	1,506357363	60,562222	60,1014598	3,853748399	15,59558476	41,19435247
22	79,02073196	8,448544	87,46927623	122,256005	1,397702259	65,0926415	58,29340377	4,028386193	14,47065921	39,46232846
23	79,12290216	8,459468	87,58237001	122,254331	1,395878318	65,2356319	58,26165326	4,031452934	14,45177563	39,43243153
24	82,76961687	8,849358	91,6189752	117,566828	1,283214832	68,7504402	56,20210652	4,23038189	13,28535059	37,52894129
25	82,3026407	8,799431	91,10207202	116,60701	1,279960017	70,1064081	56,13958172	4,236421079	13,25165291	37,47221962
26	81,63504632	8,728055	90,36310143	110,975533	1,228106731	72,9718762	55,1188466	4,335012565	12,71480665	36,554666
27	81,40090226	8,703021	90,10392372	119,059483	1,321357368	67,8221157	56,92175561	4,160871915	13,68024702	38,1862199

Fonte: Autora (2019).

## ANEXO B

Tabela D – Dados de todos os corpos de prova do ensaio de Durabilidade.

Corpo de Prova 1			Corpo de Prova 2			Corpo de Prova 3		
Densidade Seca (yd)	1,2 g/cm <sup>3</sup>		Densidade Seca (yd)	1,25 g/cm <sup>3</sup>		Densidade Seca (yd)	1,30 g/cm <sup>3</sup>	
Teor de Cimento (%)	7		Teor de Cimento (%)	7		Teor de Cimento (%)	7	
Peso (g)	1706,91		Peso (g)	1637,29		Peso (g)	1731,95	
Altura (mm)	126,19	127,17	Altura (mm)	126,34	126,88333	Altura (mm)	126,37	126,743333
	127,33			127,37			126,78	
	127,99			126,94			127,08	
Diâmetro (mm)	100,65	100,1333	Diâmetro (mm)	101,46	101,80667	Diâmetro (mm)	101,89	101,3
	99,71			101,54			100,56	
	100,04			102,42			101,45	

Fonte: Autora (2019).

Tabela E – Dados do Corpo de Prova número 1 do Ensaio de Durabilidade.

Corpo de Prova 1												
Peso específico aparente seco = 1,2 g/cm <sup>3</sup>												
Ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Peso antes do Ciclo (g)	1228,67	1209,80	1179,46	1153,98	1140,17	1130,15	1116,98	1098,89	1075,68	1043,02	1106,30	1076,60
Peso depois do Ciclo (g)	1216,76	1185,89	1159,88	1142,65	1131,47	1120,01	1101,17	1083,52	1051,09	1030,91	1085,74	1055,20
Perda de Massa por Ciclo (g)	9,31	20,45	17,70	10,68	7,31	9,76	13,45	13,45	23,76	11,17	14,35	15,95
Perda de Massa Acumulada por Ciclo (g)	9,31	29,76	47,46	58,14	65,45	75,21	88,66	102,11	125,87	137,04	151,39	167,34
Perda de Massa por Ciclo (%)	0,76	1,66	1,44	0,87	0,59	0,79	1,09	1,09	1,93	0,91	1,17	1,30
Perda de Massa Acumulada por Ciclo (%)	0,76	2,42	3,86	4,73	5,33	6,12	7,22	8,31	10,24	11,15	12,32	13,62

Fonte: Autora (2019).

Tabela F – Dados do Corpo de Prova número 2 do Ensaio de Durabilidade.

<b>Corpo de Prova 2</b>												
Peso específico aparente seco = 1,25 g/cm <sup>3</sup>												
Ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Peso antes do Ciclo (g)	1293,96	1263,88	1238,41	1223,62	1217,84	1211,56	1204,70	1194,47	1182,16	1158,70	1137,99	1117,14
Peso depois do Ciclo (g)	1277,78	1241,74	1227,91	1218,27	1213,91	1206,30	1196,61	1183,39	1166,24	1146,24	1122,43	1099,09
Perda de Massa por Ciclo (g)	14,67	20,05	7,69	4,50	5,39	5,10	6,70	8,54	13,41	10,29	14,93	15,95
Perda de Massa Acumulada por Ciclo (g)	14,67	34,72	42,41	46,91	52,30	57,40	64,10	72,64	86,05	96,34	111,27	127,22
Perda de Massa por Ciclo (%)	1,13	1,55	0,59	0,35	0,42	0,39	0,52	0,66	1,04	0,80	1,15	1,23
Perda de Massa Acumulada por Ciclo (%)	1,13	2,68	3,28	3,63	4,04	4,44	4,95	5,61	6,65	7,45	8,60	9,83

Fonte: Autora (2019).

Tabela G – Dados do Corpo de Prova número 3 do Ensaio de Durabilidade.

<b>Corpo de Prova 3</b>												
Peso específico aparente seco = 1,30 g/cm <sup>3</sup>												
Ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Antes do Ciclo (g)	1283,90	1274,23	1267,58	1259,55	1212,92	1207,94	1202,23	1197,70	1191,34	1183,69	1178,41	1169,98
Depois do Ciclo (g)	1277,88	1268,01	1261,65	1216,67	1209,11	1203,97	1199,01	1194,51	1187,89	1180,56	1174,91	1165,05
Perda de Massa por Ciclo (g)	4,83	4,61	4,98	4,17	3,24	3,83	3,22	2,98	3,24	3,04	3,24	4,16
Perda de Massa Acumulada por Ciclo (g)	4,83	9,44	14,42	18,59	21,83	25,66	28,88	31,86	35,10	38,14	41,38	45,54
Perda de Massa por Ciclo (%)	0,38	0,36	0,39	0,32	0,25	0,30	0,25	0,23	0,25	0,24	0,25	0,32
Perda de Massa Acumulada por Ciclo (%)	0,38	0,74	1,12	1,45	1,70	2,00	2,25	2,48	2,73	2,97	3,22	3,55

Fonte: Autora (2019).