

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO ACADÊMICO EM CIDADES INTELIGENTES
SUSTENTÁVEIS**

HENDRIO CARVALHO CHAVES

**UTILIZAÇÃO DO FOSFOGESSO COMO MATÉRIA PRIMA ALTERNATIVA NO
SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

São Paulo

2021

Hendrio Carvalho Chaves

**UTILIZAÇÃO DO FOSFOGESSO COMO MATÉRIA PRIMA ALTERNATIVA NO
SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**USE OF PHOSPHOGESS AS AN ALTERNATIVE RAW MATERIAL IN THE CIVIL
CONSTRUCTION SECTOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Cidades Inteligentes Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho

São Paulo

2021

Chaves, Hendrio Carvalho.

Utilização do fosfogesso como matéria prima alternativa no setor da construção civil. / Hendrio Carvalho Chaves. 2021.

89 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2021.

Orientador (a): Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho.

1. Fosfogesso. 2. Sustentabilidade. 3. Resíduos sólidos. 4. Construção civil.

I. Paschoalin Filho, João Alexandre. II. Título.

CDU 711.4

**UTILIZAÇÃO DO FOSFOGESSO COMO MATÉRIA PRIMA ALTERNATIVA NO
SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Por

Hendrio Carvalho Chaves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, sendo a banca examinadora formada por:

Prof. Dr. António José Guerner Dias – Universidade do Porto – U. PORTO

Prof. Dr. David de Carvalho – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

São Paulo, 30 de Março de 2021.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha família, a quem dedico todo meu esforço, minha alegria, os bons resultados do meu trabalho, o carinho e o incentivo ao longo de todas as conquistas da minha vida.

Aos meus amigos e colegas do curso de mestrado, em especial a André, Kátia, Joyce, Juliana, Maria das Graças, Letícia, Janete, Matheus, Rosana, Melyna e Cláudia pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências.

Ao professor João Alexandre Paschoalin Filho, de que tive todo apoio e orientação desta dissertação, como também aos professores das bancas de qualificação e defesa que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários, dos Laboratórios de Solos e de Materiais de Construção Civil, Romário e Carlos pela participação dedicada e prestativa na execução dos ensaios desta pesquisa.

Ao Marcos Marinho, pelo apoio nos piores e melhores momentos, por ter paciência e me ajudar com conselhos construtivos que levo para a vida toda.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Muito obrigado.

RESUMO

A excedente geração e disposição final dos resíduos sólidos consiste em um desafio à sociedade. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) traz as diretrizes que ajudam no descarte correto desses resíduos. Dentre os resíduos sólidos, este trabalho focará no fosfogesso, que é gerado a partir do ataque da rocha fosfática com o ácido sulfúrico para a produção de ácido fosfórico. Sua geração é em proporções de 4 a 6 vezes maior que o ácido fosfórico, sendo considerado um passivo ambiental para as empresas produtoras. Este estudo traz a incorporação do fosfogesso em solo argiloso com proporções de: 4% e 7% em massa desse resíduo. O solo utilizado foi disponibilizado pela Universidade Nove de Julho, e por ser um solo sem classificação foram realizados ensaios de caracterização do solo. Já o fosfogesso foi doado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares na forma di-hidratada. **Dessa forma, esta pesquisa tem por objetivo analisar a possibilidade de utilizar o resíduo fosfogesso como matéria prima alternativa para o setor da construção civil.** Com a introdução desse resíduo no setor da construção civil, é possível reduzir a sua disposição no meio ambiente, fazendo o setor da construção civil diminuir o impacto ambiental devido à quantidade de recursos naturais explorados e, ao mesmo tempo, tornar esse resíduo matéria-prima alternativa para o setor. Para tal, foram, primeiramente, conduzidos ensaios de caracterização geotécnica do solo e do fosfogesso. Também foram moldados corpos de prova prismáticos compactados, queimados em mufla a 900°C por 96h. Os parâmetros de resistência dos corpos de prova foram obtidos por meio de ensaios de compressão simples e tração na flexão. As análises desses dados foram feita por estatística descritiva e testes de médias utilizando o software SPSS no intuito de se determinar a melhor possibilidade desse resíduo ser utilizado no setor da construção civil. A partir dos resultados obtidos dos procedimentos laboratoriais, foi possível perceber a possibilidade de utilização de fosfogesso no setor da construção civil para todas as proporções de solo com fosfogesso estudadas. Por conta desses resultados, pode-se existir a possibilidade de reduzir as pilhas de fosfogesso estocadas próximas as indústrias de fertilizantes e ao mesmo tempo reduzir a quantidade de matéria prima extraída das jazidas de uso cerâmico.

Palavras-chave: Fosfogesso, sustentabilidade, resíduos sólidos, construção civil.

ABSTRACT

The surplus generation and final disposal of solid waste is a challenge to society. The National Solid Waste Policy (PNRS) provides guidelines that help in the correct disposal of this waste. Among the solid residues, this work will focus on phosphogypsum, which is generated from the attack of phosphate rock with sulfuric acid for the production of phosphoric acid. Its generation is in proportions of 4 to 6 times greater than phosphoric acid, being considered an environmental liability for the producing companies. This study brings the incorporation of phosphogypsum in clayey soil with proportions of: 4% and 7% by mass of this residue. The soil used was made available by the Universidade Nove de Julho, and because it is an unclassified soil, soil characterization tests were performed. Phosphogypsum was donated by the Institute for Energy and Nuclear Research in dihydrate form. Thus, this research aims to analyze the possibility of using phosphogypsum residue as an alternative raw material for the civil construction sector. With the introduction of this waste in the civil construction sector, it is possible to reduce its disposal in the environment, causing the civil construction sector to reduce the environmental impact due to the amount of natural resources explored and, at the same time, to make this waste raw material. alternative for the sector. To this end, tests were first conducted for geotechnical characterization of the soil and phosphogypsum. Compacted prismatic specimens were also molded, burned in a muffle at 900 ° C for 96h. The strength parameters of the specimens were obtained by means of simple compression and flexural tensile tests. The analysis of these data was performed using descriptive statistics and averaging tests using the SPSS software in order to determine the best possibility of this residue being used in the civil construction sector. From the results obtained from the laboratory procedures, it was possible to perceive the possibility of using phosphogypsum in the civil construction sector for all the proportions of soil with phosphogypsum studied. Because of these results, there may be a possibility to reduce the piles of phosphogypsum stored near the fertilizer industries and at the same time reduce the amount of raw material extracted from the deposits for ceramic use.

Keywords: Phosphogypsum, sustainability, solid waste, civil construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caracterização e Classificação dos Resíduos	18
Figura 2 – Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil	20
Figura 3 – Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil	21
Figura 4 – Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil	22
Figura 5 – Curva Granulométrica do Fosfogesso Com e Sem Desfloculante	30
Figura 6 – Distribuição Granulométrica do Fosfogesso	31
Figura 7 – Planta da casa experimental construída com placas de fosfogesso	35
Figura 8 – Moldes prismáticos para ensaios	44
Figura 9 – Mufla	44
Figura 10 – Máquina de ensaios de tração na flexão e compressão.....	45
Figura 11 – Curva Granulométrica do Solo.....	46
Figura 12 – Gráfico de Plasticidade.....	46
Figura 13 – Ensaio 1 de Compactação do solo.....	47
Figura 14 – Ensaio 2 de Compactação do solo.....	47
Figura 15 – Ensaio 3 de Compactação do solo.....	48
Figura 16 – Ensaio de Compactação (4% de Fosfogesso).....	48
Figura 17 – Ensaio de Compactação (7% de Fosfogesso).....	49
Figura 18 – Moldagem dos corpos de prova	49
Figura 19 – Corpos de Prova	50
Figura 20 – Diagrama de Médias	52
Figura 21 – Gráfico de correlação linear entre dosagem e resistência à tração	52
Figura 22 – Diagrama de Barras de Erro.....	55
Figura 23 – Diagrama de Médias	61
Figura 24 – Correlação linear obtida entre dosagem de fosfogesso e resistência à compressão	62
Figura 25 – Diagrama de Caixas	64
Figura 26 – Diagrama de Médias	69
Figura 27 – Correlação linear entre dosagem de fosfogesso e resistência à compressão ..	70
Figura 28 – Diagrama de Caixas	72
Figura 29 – Compressão sem mufla X Compressão com mufla.....	77
Figura 30 – Diagrama de Caixas	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atividades equivalentes de rádio em $Bq Kg^{-1}$ ($C_{Ra,eq}$) e índices de perigo externo e interno	34
Tabela 2 – Concentrações de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K ($Bq Kg^{-1}$) das amostras	37
Tabela 3 – Atividades equivalentes de rádio em $Bq Kg^{-1}$ ($C_{Ra,eq}$) e índices de perigo externo e interno	37
Tabela 4 – Valores de resistência à tração na flexão obtidos por meio dos ensaios	50
Tabela 5 – Análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios de tração na flexão.....	51
Tabela 6 – Teste de Normalidade.....	53
Tabela 7 – Teste de Homogeneidade de Variância.....	54
Tabela 8 – Análise de variância dos dados obtidos: ANOVA	54
Tabela 9 – Testes Post Hoc: Tukey HSD e Games-Howell	57
Tabela 10 – Subconjunto homogêneos.....	58
Tabela 11 – Dados obtidos dos ensaios de compressão dos corpos de prova não queimados.....	60
Tabela 12 – Análise estatística dos dados – Análise descritiva.....	60
Tabela 13 – Teste de Normalidade.....	62
Tabela 14 – Teste de Homogeneidade de Variância.....	63
Tabela 15 – Postos	63
Tabela 16 – Estatísticas Teste	63
Tabela 17 – Testes Post Hoc para Teste Kruskal-Wallis	65
Tabela 18 – Teste de Tedência: Teste Jonckheere-Terpstra (Teste Estatístico J).....	66
Tabela 19 – Dados obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão	68
Tabela 20 – Análises estatísticas conduzidas – Análise descritiva	68
Tabela 21 – Teste de Normalidade.....	70
Tabela 22 – Teste de Homogeneidade de Variância.....	71
Tabela 23 – Postos	71
Tabela 24 – Estatísticas Teste	71
Tabela 25 – Testes Post Hoc para Teste Kruskal-Wallis	73
Tabela 26 – Teste de Tedência: Teste Jonckheere-Terpstra (Teste Estatístico J).....	74
Tabela 27 – Estrutura para Análise dos Dados	76
Tabela 28 – Estatísticas Amostrais Pareadas.....	77
Tabela 29 – Correlações Amostrais Pareadas.....	78
Tabela 30 – Testes Amostrais Pareadas	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANOVA	Análise de Variância
APA	American Psychological Association
CIESP	Centro das Indústrias do Estado de São Paulo
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNM	Confederação Nacional de Municípios
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ICRP	Comissão Internacional de Proteção Radiológica
PGRS	Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SUCS	Sistema Unificado da Classificação dos Solos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	12
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS	17
2.1.1	Classificação dos resíduos sólidos	17
2.1.2	Disposição e tratamento dos resíduos sólidos nas cidades	19
2.2	INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS	23
2.3	FOSFOGESSO	25
2.3.1	Processo di-hidratado (DH).....	26
2.3.2	Processo hemi-hidratado (HH).....	27
2.3.3	Processo hemi-di-hidratado (HDH).....	28
2.3.4	Processo anidro.....	29
2.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO FOSFOGESSO	29
2.5	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E MINERALÓGICAS DO FOSFOGESSO	31
2.6	CARACTERÍSTICAS RADIOLÓGICAS DO FOSFOGESSO	33
2.7	APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO	38
2.7.1	Agricultura.....	38
2.7.2	Cimento	39
2.7.3	Construção Civil.....	39
2.7.4	Pavimentação.....	40
2.8	FOSFOGESSO COMPACTADO	41
2.8.1	Relação entre Massa Específica Seca e Umidade	41
2.8.2	Resistência à Compressão Simples	42
3	MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA	43
3.1	Caracterização da Pesquisa.....	43
3.2	Procedimentos Experimentais	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	45
4.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	50
4.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (SEM MUFLA E COM MUFLA)	60
4.3.1	Resistência à compressão sem mufla (não submetidos à queima em mufla)	60
4.3.2	Resistência à compressão com mufla (submetidos à queima em mufla)	68
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (SEM MUFLA) X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (COM MUFLA)	76
5	CONCLUSÃO	83
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Devido ao crescimento das cidades, o setor da construção civil tornou-se o maior consumidor de recursos naturais e, dentre as possibilidades de redução dos impactos ambientais do setor, destaca-se a incorporação de resíduos em suas atividades cotidianas. Os resíduos industriais merecem atenção por sua disposição e tratamento, pois em sua maioria contêm substâncias prejudiciais ao meio ambiente (Fernandes, 2017; Magalhães, 2016; Gonçalves & Cardoso, 2016; Canut, 2006).

O processo de industrialização e o crescimento das cidades influenciam consideravelmente o espaço urbano. O setor industrial promove transformações urbanas e também da multiplicação de diversos ramos de serviços que caracterizam a cidade moderna. Para reduzir a geração de resíduos sólidos industriais, é preciso ter uma gestão durante o processo de produção (Sampaio & Werlang, 2016).

Segundo a Resolução CONAMA n. 313 de 29 de outubro de 2002, os resíduos industriais são definidos como todo resíduo advindo de atividades industriais nos estados sólidos, semissólidos, gasosos e líquidos, cujas particularidades tornem inviáveis seu lançamento nas redes públicas de esgoto ou em corpos d'água. Ficam incluídos nessa classificação os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

Dentre os resíduos industriais, destaca-se o fosfogesso, um subproduto da principal matéria prima utilizada nas indústrias de fertilizantes fosfatados: ácido fosfórico. (Cánovas, Macías, Pérez-López, Basalloete & Millán-Becerro, 2018; Batalha, 2011; Oliveira, 2005). No Brasil, o fosfogesso é considerado um passivo ambiental devido à estocagem de grandes quantidades desse material, uma vez que para cada tonelada de ácido fosfórico produzido, gera-se fosfogesso em proporções de 4 a 6 vezes maior, próximas das indústrias de fertilizantes fosfatados. Essa estocagem gera uma série de problemas, entre os quais destacam a necessidade de dispor-se de grandes áreas para seu armazenamento e monitoramento. A disposição do fosfogesso localiza-se em aterros próximos às indústrias químicas fabricantes do ácido fosfórico, e é frequentemente adotado em quase todo mundo (Canut, 2006; Oliveira, 2005).

Ao levar em consideração a questão ambiental, o governo brasileiro, por meio da Lei n. 12.305 de 2 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual

contêm instrumentos que permitem o desenvolvimento do país no enfrentamento dos problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos. Além disso, também instituiu às empresas a responsabilidade sobre os resíduos produzidos por meio da elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) (Alves, 2015).

De acordo com o Centro das Indústrias do Estado de São Paulo/CIESP (ciesp.com.br/noticias/politica-de-residuos-solidos-completa-dez-anos-e-precisa-avancar/, recuperado em 14 de outubro de 2020), há uma década o Brasil avançou em busca da normatização dos resíduos sólidos urbanos em seu território por meio da PNRS. Sua aprovação foi considerada um avanço simbólico na visão de especialistas e autoridades do setor.

Nesses dez anos de PNRS identifica-se o crescimento da coleta seletiva, a consolidação de sistemas de Logística Reversa, o engajamento empresarial e de quem está à frente da indústria nacional com os compromissos da PNRS. Entretanto, por mais que se tenham avanços, há também vários desafios que não foram solucionados, tais como o fim dos lixões, a falta de estudos e diagnósticos do setor que impedem um planejamento estratégico e a ampliação dos sistemas de saneamento público nos municípios (ciesp.com.br/noticias/politica-de-residuos-solidos-completa-dez-anos-e-precisa-avancar/, recuperado em 14 de outubro de 2020).

Desde 2010 a Confederação Nacional de Municípios/CNM (cnm.org.br/comunicacao/noticias/pnrs-completa-dez-anos-cnm-lanca-serie-de-materias-sobre-dificuldades-de-execucao-pelos-municipios, recuperado em 14 de outubro de 2020) vem alertando que é preciso que todos os envolvidos cumpram com suas responsabilidades, pois sem a junção de ações será impossível que haja uma gestão dos resíduos sólidos para fins de desenvolvimento sustentável.

Um dos exemplos é a necessidade da União aprovar legislações que tragam incentivos fiscais para produtos industrializados a partir de matérias primas recicláveis. Vale ressaltar também a criação de incentivos para que indústrias de reciclagem possam avançar e construir outras unidades industriais em todas as regiões do Brasil (cnm.org.br/comunicacao/noticias/pnrs-completa-dez-anos-cnm-lanca-serie-de-materias-sobre-dificuldades-de-execucao-pelos-municipios, recuperado em 14 de outubro de 2020).

A CNM (cnm.org.br/comunicacao/noticias/pnrs-completa-dez-anos-cnm-lanca-serie-de-materias-sobre-dificuldades-de-execucao-pelos-municipios, recuperado em 14 de outubro de 2020) explica que a dificuldade aumenta ainda mais porque 88% do país é formado por municípios com até 50 mil habitantes, fazendo com que esses territórios não existam indústrias de reciclagem e o deslocamento de resíduos sólidos recicláveis secos até essas indústrias tornam-se inviáveis economicamente. Devido a isso Entes locais perdem materiais recicláveis e acabam sendo classificados como rejeitos. Isso acontece por causa dos altos custos econômicos e as dificuldades da logística de deslocamento desses resíduos até suas respectivas recicladoras.

Do que diz respeito ao resíduo fosfógeno, Canut (2006) explica que sua crescente geração preocupa cada vez mais os órgãos ambientais. Como exemplo tem-se o Complexo Industrial de Uberaba-MG, da empresa Valefertil Fertilizantes. Esse complexo é a maior unidade de produção de ácido fosfórico do Brasil com capacidade de produção de 700 mil toneladas por ano, conseqüentemente produzindo cerca de três milhões de toneladas de fosfógeno por ano, onde a empresa coloca no mercado apenas 25% de sua produção, sendo obrigada a estocar o excedente em uma pilha, que ocupa uma área superior a 1.000.000m² com altura média de 30m (Fernandes, 2017).

Segundo Chagas (2014), na cidade do Catalão, localizada no estado de Goiás, abriga uma indústria de fertilizantes. Essa indústria atinge uma produção de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e fertilizante granular. Segundo Rufo (2009) em 2008 essa indústria gerou aproximadamente 600 mil toneladas de fosfógeno que são estocados a céu aberto. Chagas (2014) explica que a produção excessiva desse resíduo gerou preocupação em reutilizar o mesmo de maneira correta.

Chagas (2014) explica também que o fosfógeno dessa indústria tem sido reutilizado nas indústrias de cimento e papel e na agricultura, porém esse aproveitamento chega apenas a 10% do montante gerado. Com isso, diversos estudos têm sido realizados de forma a avaliar o potencial de utilização do fosfógeno em misturas com solos para a aplicação em obras geotécnicas (Chagas, 2014). O uso desse passivo ambiental na construção civil poderá contribuir com a minimização da disposição desse resíduo em pilhas a partir de sua adequada destinação (Canut, 2006).

Segundo Rufo (2009) a indústria da construção civil é uma grande geradora de resíduos e é considerado um ramo que pode melhor absorver esses resíduos. De acordo com as pesquisas de Mesquita (2007) e Oliveira (2005), a utilização de produtos reciclados podem ser uma alternativa viável em substituição a matérias primas utilizada tradicionalmente. Rufo (2009) explica que a produção de fosfogesso supera o consumo, resultando em um acúmulo do resíduo próximo as fábricas. Com isso torna-se interessante a utilização prática do fosfogesso dando-lhe uma destinação viável do ponto de vista ambiental e técnico.

Segundo Oliveira (2014), Villaverde (2008) e Canut (2006) o fosfogesso, devido a semelhança com o gesso em relação as suas propriedades físicas e químicas, pode vir a ser substituído na fabricação de placas de forro, painéis, divisórias, blocos pré-moldados, pisos e revestimento. Constatada a abundância e a falha no aproveitamento e monitoramento desse resíduo, o trabalho de Canut (2006) buscou uma alternativa economicamente viável para o reaproveitamento do fosfogesso depositado no Brasil.

Villaverde (2008) explica que tem havido grande interesse em integrar o fosfogesso como material de construção civil, tanto como material de vedação como placas pré-fabricadas a base de fosfogesso, quanto como material de acabamento ou de revestimento interno na construção de casas populares em grande escala. Essa prática poderia baratear sensivelmente o custo da construção devido a grande disponibilidade do material (Villaverde, 2008).

Fernandes (2017) descreve que uma das alternativas para o consumo do fosfogesso é na construção civil na fabricação de placas, painéis, tijolos e ladrilhos. Oliveira (2014) descreve que na construção civil o fosfogesso pode ser empregado na fabricação de artefatos, na fabricação de placas para forro, molduras, painéis decorativos, em blocos pré-moldados, na composição de argamassas de contra-pisos e revestimentos verticais e horizontais.

Portanto, considerando a situação apresentada, esta pesquisa se destina a responder a seguinte questão de pesquisa: Qual dosagem entre fosfogesso e solo é a mais adequada para a incorporação desse resíduo como materia prima alternativa no setor da construção civil?

Para responder a esta questão, nesta pesquisa serão apresentados os procedimentos metodológicos que serão utilizados para verificar a possibilidade de incorporação do fosfogesso

em diferentes dosagens; para posterior análise das características de engenharia obtidas a partir das normas técnicas pertinentes.

Destaca-se também que a geração de resíduos industriais tem tido destaque por gerar problemas ambientais. Encontrar métodos adequados de eliminação desses resíduos é um tema importante em centros de pesquisa que estudam materiais alternativos que causam impacto ambiental. O reaproveitamento do fosfogesso é importante tanto do ponto de vista econômico-social quanto em relação à preservação ambiental. Por isso, o fosfogesso pode-se tornar uma matéria prima alternativa para o setor da construção civil, fazendo diminuir o impacto nos aterros próximos às indústrias químicas (Magalhães, 2016; Silveira & Borges, 2016; Canut, 2006; Oliveira, 2005).

A seguir são apresentados os objetivos desta pesquisa:

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a melhor dosagem entre fosfogesso e solo com vistas a sua aplicação no setor da construção civil como material alternativo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo descrito se fazem necessários os seguintes objetivos específicos:

- Determinar as características físicas, radiológicas, morfológicas e mineralógicas do fosfogesso;
- Determinar as propriedades mecânicas das misturas (solo e fosfogesso) por meio de testes de resistência de tração na flexão e compressão simples;
- Avaliar a possibilidade de utilização do fosfogesso em um processo de produção alternativo para materiais de construção civil por meio de análise estatística;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS

2.1.1 Classificação dos Resíduos Sólidos

De acordo com a ABNT NBR 10.004/2004, os resíduos sólidos resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Estão incluídos também os lodos advindos de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como líquidos que são inviáveis o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções econômica e tecnicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Este conceito encontra-se na Lei n. 12.305, publicada em 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que reúne o conjunto de princípios, objetivos e instrumento, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

De acordo com a PNRS, os resíduos sólidos são classificados quanto à origem e quanto à periculosidade. Os resíduos de classificação quanto à origem subdividem-se em resíduos domiciliares, resíduos de limpeza urbana, resíduos industriais, resíduos de serviço de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrossilvopastoris, resíduos de serviço de transporte e resíduos de mineração.

Já os resíduos classificados quanto à periculosidade, tem-se os resíduos perigosos e os resíduos não perigosos. Os resíduos perigosos são aqueles que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade e apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental. Do que diz respeito aos resíduos não perigosos, são aqueles cuja suas características não se enquadram nas especificações dos resíduos perigosos.

Além da classificação apresentada pela PNRS, a ABNT NBR 10004/2004 também traz o processo de classificação, que envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

A norma complementa que a identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização dos resíduos deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias-primas,

os insumos e o processo que lhe deu origem. Para efeitos desta norma, os resíduos são classificados em resíduos classe I (perigosos) e resíduos classe II (não perigosos). Para os resíduos classe II, dividem-se em resíduos classe II A (não inertes) e resíduos classe II B (inertes).

Pela ABNT NBR 10.004/2004 os resíduos classe I tem como característica principal a sua periculosidade em função das propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podendo apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, e riscos ao meio ambiente quando o gerenciamento do resíduo for feito de forma inadequada.

Já os resíduos classe II A são aqueles que não estão enquadrados nas classificações de resíduos classe I e podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os resíduos classe II B são aqueles que quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

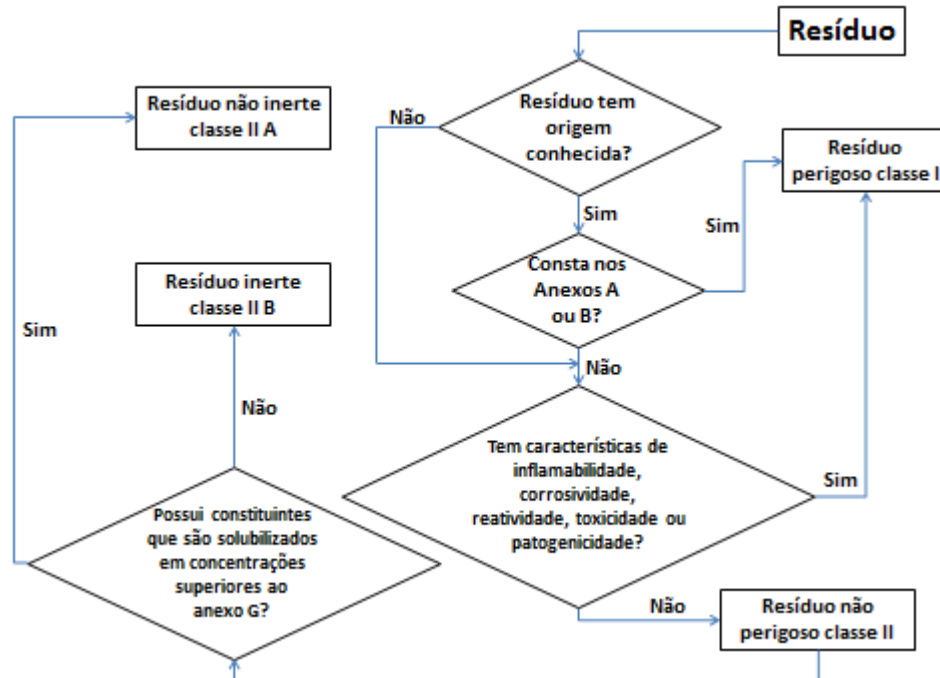


Figura 1. Caracterização e classificação de resíduos

Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) NBR 10.004. *Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro.

De acordo com a figura 1, para classificar um resíduo deve-se primeiramente identificar se a origem é conhecida e se está descrito nos anexos A e B da ABNT NBR 10.004/2004 de maio de 2004. Caso conste, classifica-se o resíduo como perigoso classe I. Na situação de não conhecer a origem e não constar nos anexos descritos observa-se se tem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Se tiver, o resíduo também é perigoso classe I, caso contrário é não perigoso classe II.

Quando o resíduo já é classificado como perigoso classe II, deve-se verificar se o mesmo possui constituintes que são solubilizados em concentrações superiores descritos no anexo G da NBR n. 10.004 de maio de 2004. Se possuir, o resíduo é não inerte classe II A. Se não apresentar essas características, o resíduo é inerte classe II B.

2.1.2 Disposição e Tratamento dos Resíduos Sólidos nas Cidades

Nos últimos anos, os resíduos sólidos vem se apresentando como um dos principais problemas das áreas urbanas, pois sua geração, descarte e disposição inadequados provocam degradação do solo, comprometimento dos corpos d'água e mananciais, intensificação de enchentes, contribuição para a poluição do ar e proliferação de vetores de importância sanitária nos centros urbanos. Com este cenário, é cada vez mais evidente que a adoção de padrões de consumo e produção sustentáveis e o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos pode diminuir consideravelmente os impactos ao ambiente e à saúde (Santos, 2017; Jacobi & Besen, 2011).

Um dos maiores problemas em cidades densamente urbanizadas, principalmente em regiões metropolitanas, é a ausência de locais próprios à disposição dos resíduos de forma adequada. Isso se deve aos impactos de vizinhança das áreas de disposição e à existência de áreas protegidas. Além disso, na maioria dos aterros sanitários não existe tratamento adequado para o líquido tóxico gerado pela decomposição orgânica do lixo (chorume). Como consequência, os resíduos tóxicos podem contaminar fontes de águas subterrâneas e o solo, e ao mesmo tempo são liberados gases advindos do processo de decomposição no meio ambiente descontroladamente (Jacobi & Besen, 2011).

A administração pública municipal das cidades tem a responsabilidade de gerenciar os resíduos sólidos de forma ambientalmente segura. Com isso, o poder público, além de gerenciar

corretamente os próprios resíduos sólidos gerados por suas atividades, deve disciplinar o fluxo de resíduos nos municípios (Jacobi & Besen, 2011).

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) disponibilizam dados que permitem visualizar a realidade brasileira que com relação à produção de resíduos sólidos urbanos (RSU). De acordo com o Panorama de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil de 2017 elaborado pela ABRELPE, demonstra que os números referentes à geração de RSU trazem anualmente um total de 78,4 milhões de toneladas no país.

A soma coletada em 2017 foi de 71,6 milhões de toneladas, e foi registrado um índice de cobertura de coleta de 91,2%, e com isso evidenciou que 6,9 milhões de toneladas de resíduos não passaram pelo processo de coleta, ou seja, tiveram destino impróprio (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais [ABRELPE], 2017). Com relação à disposição final dos RSU, em 2017, o Panorama da ABRELPE não registrou avanços em relação à 2016, mantendo praticamente a mesma proporção entre o que segue para locais adequados e inadequados, com cerca de 42,3 milhões de toneladas de RSU, ou 59,1% do coletado, levados para aterros sanitários (ABRELPE, 2017).

Os outros 40,9% dos resíduos coletados, foram para locais inadequados por 3.352 municípios brasileiros, com um total de 29 milhões de toneladas de resíduos direcionados a lixões ou aterros controlados, com ausência de conjunto de medidas e sistemas necessários para a proteção do meio ambiente e à saúde humana. Em suma, a população do Brasil teve um acréscimo de 0,75% entre 2016 e 2017, e ao mesmo tempo a geração per capita de RSU teve um aumento de 0,48%. A geração total de resíduos aumentou 1% no mesmo período, o que totalizou 214.868 toneladas diárias de RSU no país (ABRELPE, 2017).

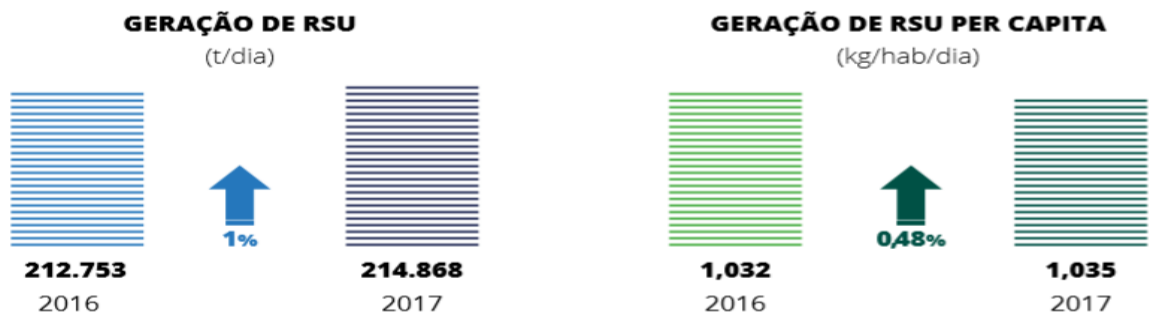


Figura 2. Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Fonte: Recuperado de “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017” de Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Sólidos, 2017.

De acordo com o Panorama de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil de 2018/2019 elaborado pela ABRELPE demonstra que foram gerados em 2018 no Brasil 79 milhões de toneladas, um aumento de pouco menos de 1% em relação ao ano anterior. Desse montante, 92% (72,7 milhões) foram coletados. Isso significa uma alta de 1,66% em comparação com 2017, ou seja, a coleta teve um aumento pouco considerável quando comparado com a geração. Evidencia-se também que 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração (ABRELPE, 2018/2019).

A destinação adequada em aterros sanitários recebeu 59,5% dos resíduos sólidos urbanos coletados (43,3 milhões de toneladas). Esse valor significa um avanço pequeno em relação ao ano anterior. Já o restante (40,5%) foi despejado em locais inadequados por 3.001 municípios. Ou seja, 29,5 milhões de toneladas de RSU foram para lixões ou aterros controlados que não apresentam sistemas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2018/2019).

Entre 2017 e 2018, a geração de RSU no Brasil aumentou quase 1% e chegou a 216.629 toneladas diárias. Como a população também cresceu no período (0,40%), a geração per capita teve aumento um pouco menor (0,39%). Isso quer dizer que, em média, cada brasileiro gerou pouco mais de 1 quilo de resíduo por dia (ABRELPE, 2018/2019).

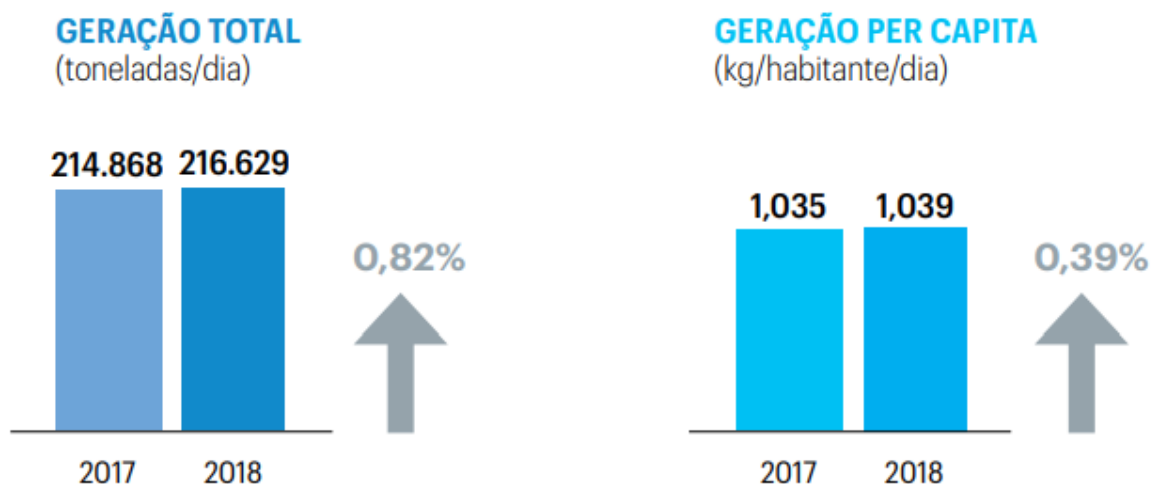


Figura 3. Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Fonte: Recuperado de “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019” de Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Sólidos, 2018/2019.

De acordo com o Panorama de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil de 2020 elaborado pela ABRELPE, entre 2010 e 2019, a geração de RSU no Brasil registrou considerável avanço, passando de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano. Por sua vez, a geração per capita aumentou de 348kg/ano para 379kg/ano.

Segundo a ABRELPE (2020) no Brasil, a maior parte dos RSU coletados segue para disposição em aterros sanitários, tendo registrado um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década, passando de 33 milhões para 43 milhões de toneladas. Todavia, a quantidade de resíduos que segue para unidades inadequadas também cresceu, passando de 25 milhões de toneladas para pouco mais de 29 milhões de toneladas por ano (ABRELPE, 2020).

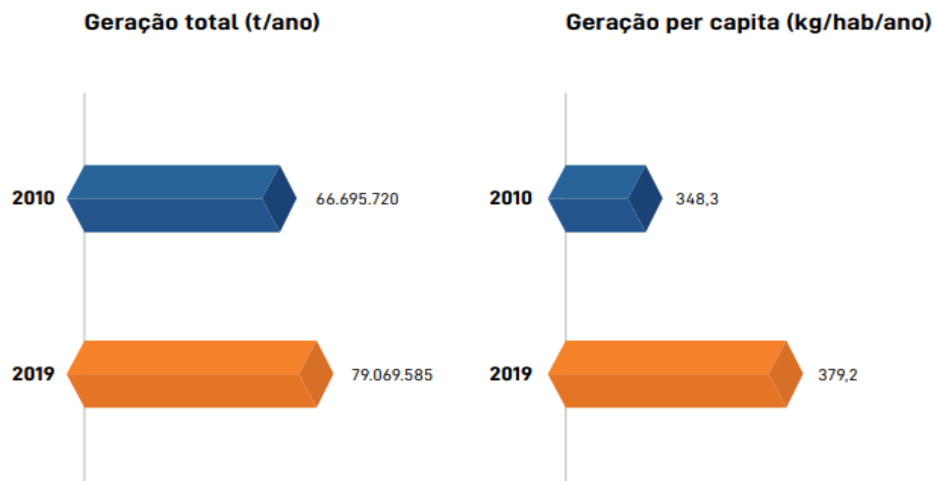


Figura 4. Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Fonte: Recuperado de “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020” de Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Sólidos, 2020.

De acordo com a ABRELPE (2009) na Região Metropolitana de São Paulo operam oito aterros sanitários privados, que juntos recebem cerca de 13.500 toneladas por dia de RSU, que corresponde a 57,5% do total que são direcionados aos aterros privados do Brasil. Além disso, estima-se que a geração per capita média é de 0,8kg/dia de resíduos domiciliares, e no município de São Paulo é cerca de 1kg/dia (Besen, 2011).

Em outros países o gerenciamento de resíduos sólidos demonstram problemas comuns e de difícil gestão em qualquer que seja a localidade. No caso da União Europeia, o gerenciamento e tratamento do lixo urbano tem sido uma das barreiras mais complicadas da política ambiental.

Em 2007 o total arrecadado por estes países foi 258,5 milhões de toneladas, com média de 9,7 milhões de toneladas por país (Fundação de Apoio ao Desenvolvimento, 2012).

Os países mais industrializados e ricos como Alemanha (46,4 milhões de toneladas), Reino Unido (34,8 milhões de toneladas), França (34,4 milhões de toneladas), Itália (32,5 milhões de toneladas) e Espanha (26,2 milhões de toneladas) relataram somas superiores em relação ao valor médio dos países europeus (Fundação de Apoio ao Desenvolvimento, 2012).

Em se tratando de União Europeia, em 2007, a quantidade média de resíduos produzidos por indivíduo foi correspondente a 522kg (1,43kg/dia). Porém, esse valor varia de país para país. Por exemplo, a Dinamarca (801kg/hab), a Irlanda (788kg/hab) e o Chipre (754kg/hab) tiveram maior produção per capita de resíduos urbanos do continente europeu, e ao mesmo tempo a República Checa (294kg/hab), e Eslováquia (309kg/hab) atingiram os menores valores. Na Espanha e em Portugal o lixo gerado foi de 588kg/hab (1,61kg/dia) e 471kg/hab (1,29kg/dia) respectivamente (Menédes & Cañete, 2010).

Nos Estados Unidos todos os anos a Agência de Proteção Ambiental Americana publica relatórios que mostra a situação da geração, reciclagem e disposição final de RSU. Os dados de 2010 exibem que houve uma geração cerca de 250 milhões de toneladas de RSU. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, a geração de resíduos aumentou acompanhando o aumento populacional, de 1,66kg/dia/hab para 1,82kg/dia/hab entre 1980 e 2010 (Fundação de Apoio ao Desenvolvimento, 2012).

Já no Japão, devido ao aumento dos custos relacionado ao tratamento e disposição final de resíduos sólidos levando em consideração a incineração e reciclagem, aumentou a vida útil dos aterros, porém estes custos são suportados por entidades governamentais. Em 2002 as despesas com gestão de RSU foi de aproximadamente 19 bilhões de dólares, ou 150 dólares/per capita ou 374 dólares/tonelada. Se comparado com os Estados Unidos, as despesas são maiores, uma vez que no estado americano não se encontram relatos de despesas maiores que 88 dólares/toneladas (Fundação de Apoio ao Desenvolvimento, 2012).

2.2 INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

Os depósitos fosfáticos se dividem em quatro grupos principais: jazidas de origem ígnea, jazidas de origem sedimentar, jazidas resultantes de acúmulo de matéria orgânica e fosfatos lateríticos ou de enriquecimento supérgeno. Porém as indústrias de fertilizantes utilizam,

principalmente, material advindo das jazidas de origem ígnea e sedimentar. Os depósitos fosfáticos de origem ígnea são corpos elípticos ou circulares de intrusões magmáticas contendo rochas do tipo carbonatitos, piroxenitos, dunitos e biotititos, algumas vezes associadas a rochas do tipo sienitos. O principal mineral dessas rochas é a apatita (fluorapatita) $Ca_5(PO_4)_3F$. Geralmente, o teor primário de apatita dos carbonatitos e rochas ultrabásicas associadas é menor que 10%, e o teor de P_2O_5 (pentóxido de difósforo – concentrado fosfático para fins de comercialização) é cerca de 5% (Mesquita, 2007; Canut, 2006).

No caso das rochas fosfáticas de origem sedimentar, se constituem em camadas, níveis ou extratos, que correspondem ao acúmulo de fosfatos de precipitação química com ou sem o auxílio de microrganismos em fungos de mares ou de lagos (depósitos de plataforma continental). Essas rochas estão associadas a calcários com menor ou maior quantidade de sedimentos argilosos. Os minérios sedimentares de fósforo são chamados de fosforitos e o principal mineral do fósforo é o carbonato-apatita. No Brasil, as principais jazidas de rochas fosfáticas estão situadas nas regiões nordeste e sudeste. Esse fato é importante para a avaliação de aspectos relacionados à utilização do fosfogesso uma vez que a proximidade dos centros consumidores pode torna-lo material competitivo e alternativo em setores da construção (Canut, 2006; Oliveira, 2005).

A produção de fertilizantes fosfatados de alta concentração em P_2O_5 é feita a partir de rochas fosfáticas e constitui-se de três fases: o beneficiamento físico do minério, o tratamento químico e a preparação das misturas fosfatadas comerciais. Neste caso, a rocha fosfática é lavrada e transportada para ser submetida à britagem com o objetivo da redução granulométrica do minério até o diâmetro final em torno de 32mm. O material britado é estocado em pilhas de homogeneização para fins de prover à usina de beneficiamento de material homogêneo em granulometria e teor de P_2O_5 , e também servir como estoque regulador de alimentação da usina (Mesquita, 2007; Oliveira, 2005).

Depois das pilhas de homogeneização, o material é retomado à usina, visando à concentração dos minerais de fósforo por meio das etapas a seguir (Villaverde, 2008; Mesquita, 2007):

- **Moagem e classificação:** A moagem é feita num conjunto de moinhos por via úmida, operando em circuito fechado com ciclones de classificação;
- **Deslamagem:** Ocorre a separação das partículas de tamanho menor a $20\mu\text{m}$ a partir de hidrociclones;

- **Condicionamento:** São adicionados vários reagentes ao material em suspensão, conhecidos como agentes coletores e depressores;

- **Flotação:** A polpa condicionada é submetida à flotação, que tem por objetivo chegar à concentração dos compostos de fósforo pela separação de outros compostos diluentes. A flotação é efetuada em três etapas diferentes, cada qual com sua própria bateria de células de flotação;

- **Desaguamento e filtração:** Após a flotação, a polpa final conhecida como concentrado de flotação é submetido a uma operação de espessamento, sendo depois encaminhado à filtração, num filtro a vácuo.

O material que sai do processo de filtragem apresenta teor de umidade em torno de 10%, sendo submetido ao processo de secagem, utilizando secadores verticais de fluxo ascendente e de alta eficiência, resultando num valor de umidade final praticamente nula. O produto final de umidade quase nula contém entre 36 e 38% de P_2O_5 . No caso de um processamento parcial, que exclui a flotação, o produto obtido tem um teor próximo de 24% de P_2O_5 (Villaverde, 2008; Mesquita, 2007).

2.3 FOSFOGESSO

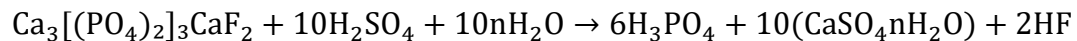
Cerca de 85% da produção mundial de ácido fosfórico é processado por via úmida. Sua produção nas indústrias de fertilizantes fosfatados é representada pela reação de ataque do concentrado fosfático pelo ácido sulfúrico. A tecnologia para a obtenção do ácido fosfórico consiste em desenvolver um meio reativo ideal, de forma a converter o fósforo da rocha fosfática em ácido fosfórico. A quantidade de H_2SO_4 (ácido sulfúrico) necessária à reação é aproximadamente estequiométrica para reagir com o CaO (óxido de cálcio) do concentrado fosfático. Para um cálculo mais preciso, deve-se levar em consideração as impurezas como Fe_2O_3 (óxido de ferro), Al_2O_3 (óxido de alumínio) e MgO (óxido de magnésio) (Mesquita, 2007).

A partir da obtenção do ácido fosfórico, gera-se um composto químico denominado fosfogesso que é referenciado na literatura técnica como subproduto do gesso, gesso químico, resíduo de gesso, gesso agrícola e gesso sintético. Por conter resíduos de fósforo este é chamado de fosfogesso. Sua produção é em proporções de 4 a 6 vezes maior que a do próprio ácido fosfórico, com isso este resíduo é considerado um passivo ambiental para as empresas produtoras

de fertilizantes. Para nível de classificação, a NBR n. 10.004 de maio de 2004 classifica o fosfogesso como resíduo não perigoso classe II B, sendo considerado inerte. Além disso, durante o processo úmido para a obtenção do ácido fosfórico, diferentes composições de fosfogesso são obtidos: di-hidratado (DH), hemi-hidratado (HH), hemi-di-hidratado (HDH) e anidro (Canut, 2006; Oliveira, 2005).

A temperatura e a concentração do ácido fosfórico são os fatores responsáveis pelas diversas formas alotrópicas do fosfogesso. As formas di-hidratada, hemi-hidratado e anidro dependem principalmente da temperatura de reação entre a rocha fosfática e das concentrações de ácido fosfórico no resíduo. Essa concentração é determinada pela quantidade de água de lavagem usada para remover o P_2O_5 do sulfato de cálcio no decorrer da filtragem (Oliveira, 2005).

A obtenção do fosfogesso pelo processo úmido é descrito por meio da equação (Mangin, 1978a; Barbosa, 1980; Ferguson, 1988; Haridasan et al., 2000 como citado em Oliveira, 2005):



Em que:

- $Ca_3[(PO_4)_2]_3CaF_2 \rightarrow$ Fluorapatita
- $H_2SO_4 \rightarrow$ Ácido Sulfúrico
- $H_2O \rightarrow$ Água
- $CaSO_4nH_2O \rightarrow$ Fosfogesso
- $H_3PO_4 \rightarrow$ Ácido Fosfórico
- $HF \rightarrow$ Ácido Sulfúrico

O n na equação pode ter três valores diferentes:

- Para $n = 2$, o fosfogesso é obtido na forma di-hidratado, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.
- Para $n = 1/2$, o fosfogesso é obtido na forma hemi-hidratado, $CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$.
- Para $n = 0$, o fosfogesso é anidro, $CaSO_4$.

2.3.1 Processo di-hidratado (DH)

De acordo com os autores Schrodter (1991), Taha e Seals (1991), Chang e Mantell (1990), Wirsching et al. (1985), Bruno (1980), Barbosa (1980) e Mangin (1978) como citado em Oliva (1997), o processo di-hidratado é o mais utilizado mundialmente para a produção do ácido

fosfórico. É por meio desse processo que resulta em fosfogesso di-hidratado. Além disso, as concentrações de P_2O_5 do ácido fosfórico obtidas variam entre 28% e 30%. Oliveira (2005) explica que esse processo desenvolve-se em temperaturas entre 71°C e 85°C. Porém outros autores como Oliva (1997), Matos (2011) e Oliveira (2014) abordam que essas temperaturas variam entre 70°C e 80°C.

Neste processo o fosfogesso apresenta duas moléculas de água em sua composição ($CaSO_4 \cdot nH_2O$, com $n = 2$). São utilizadas temperaturas entre 70°C e 80°C na reação do ácido sulfúrico com a rocha fosfática. Dessa reação gera-se uma poupa que segue para um processo de filtragem e secagem composta de três etapas. Inicialmente é feita a primeira filtragem, sendo este 1º filtrado levado para estoque (ácido fosfórico com 28 a 30% de P_2O_5). Na segunda etapa que é composta da primeira lavagem e uma segunda filtragem é produzido o 2º filtrado, que é reciclado no reator (ácido fosfórico fraco com 20% de P_2O_5). E por fim ocorre a terceira etapa que é feita a segunda lavagem e uma terceira filtragem. O 3º filtrado vai para a primeira lavagem e o subproduto sólido separado, denominado fosfogesso, é enviado para a área de disposição ou armazenamento (Matos, 2011).

Este processo apresenta também vantagens e desvantagens. No caso das vantagens citam-se: o baixo custo de implementação do sistema, o baixo custo de produção, a flexibilidade de usar diferentes tipos de rochas fosfáticas, sejam elas de origem ígnea, sedimentar ou orgânica, e ainda permite a extração de urânio presentes nas rochas fosfatadas. Quanto às desvantagens citam-se: menor rendimento na produção de ácido fosfórico e com isso apresenta maior quantidade de impurezas no fosfogesso, as quais contêm resíduos que devido a suas características podem agredir o meio ambiente, e para cada tonelada de P_2O_5 produzido, são geradas 4,9 toneladas de fosfogesso di-hidratado (Matos, 2011; Oliva, 1997).

2.3.2 Processo hemi-hidratado (HH)

Segundo Matos (2011), Mesquita (2007) e Oliveira (2005), este processo é empregado na África, Europa e principalmente no Japão. Os autores explicam que o fosfogesso hemi-hidratado é obtido em intervalo de temperaturas de 93°C a 132°C e produz ácido fosfórico hemi-hidratado a uma concentração de 38% a 42% de P_2O_5 . Oliva (1997) descreve que algumas pesquisas relatam que essas concentrações podem atingir 52%. Além disso, a produção de 1 tonelada de

ácido fosfórico gera aproximadamente 4,3 toneladas de fosfogesso hemi-hidratado (Matos, 2011; Mesquita, 2007; Oliveira, 2005).

Para os autores Matos (2011), Mesquita (2007), Oliveira (2005), Junior (2002) e Oliva (1997), uma das vantagens apresentadas pelo processo hemi-hidratado está relacionado com o processo di-hidratado, pois as concentrações de P_2O_5 no ácido fosfórico são maiores. Quanto maiores forem as concentrações de P_2O_5 , geram-se partículas mais finas de fosfogesso e com menores quantidades de impurezas. Existe também uma dissolução mais rápida da rocha fosfática e uma maior velocidade de filtração do ácido fosfórico (Matos, 2011; Mesquita, 2007; Oliveira, 2005; Junior, 2002; Oliva, 1997).

Quanto às desvantagens, Matos (2011), Mesquita (2007), Junior (2002) e Oliva (1997) explicam que existe um maior consumo de energia devido o processo ocorrer em altas temperaturas. E o principal problema ocorre na etapa de filtração, pois existem pequenas quantidades de partículas di-hidratadas que fazem as partículas em condições hemi-hidratadas sejam reidratadas. Logo para evitar esse processo de reidratação, é recomendável o uso de temperaturas maiores durante o processo HH.

No Japão, a maioria das fábricas de fertilizantes fosfatados utilizam um método modificado do processo hemi-hidratado que transforma diretamente o fosfogesso em matéria-prima para a produção de cimento Portland, sem que mesmo passe por tratamentos de purificação. Este método é conhecido como “hemi nissan” resultando no tipo de fosfogesso de mesmo nome é utilizado como substituto do gesso natural. A implementação desse processo no Japão é estimulada pela falta de jazidas naturais de gipsita em seu território (Mesquita, 2007; Oliveira, 2005; Junior, 2002).

2.3.3 Processo hemi-di-hidratado (HDH)

Este processo é a junção das técnicas dos processos di-hidratado e hemi-hidratado para a obtenção do ácido fosfórico, envolve a precipitação do sulfato de cálcio na forma hemi-hidratada seguida da sua recristalização para a forma di-hidratada. Assim, o procedimento utiliza parte da simplicidade do processo di-hidratado e gera um resíduo com menores quantidades de impurezas semelhantes ao fosfogesso hemi-hidratado. O processo hemi-di-hidratado é utilizado na Europa e no Japão, e é bastante atrativo do ponto de vista econômico, pois se desenvolve a temperaturas que variam de 90°C a 100°C e obtêm concentrações de P_2O_5 variando de 40% a 52% com

geração de um fosfogesso mais limpo. Com relação à razão de produção entre o fosfogesso e o ácido fosfórico, é igual a do processo hemi-hidratado, ou seja, para cada tonelada de ácido fosfórico, são produzidos 4,3 toneladas de fosfogesso (Matos, 2011; Oliveira, 2005).

2.3.4 Processo anidro

Esse processo produz fosfogesso em condições anidras, logo não há a presença de moléculas de água em sua composição. É desenvolvido no intervalo de temperaturas de 120°C a 130°C e atinge aproximadamente uma concentração de 50% de P_2O_5 no ácido fosfórico produzido. A produção de 1 tonelada de ácido fosfórico gera cerca de 3,5 toneladas de fosfogesso anidro. Apesar de produzir quantidades menores de fosfogesso, poucas fábricas no mundo adotam este procedimento devido aos elevados custos de produção provocados pela corrosão acelerada de máquinas e equipamentos industriais e pelo alto consumo de energia durante sua operação. Por mais que este processo tenha um alto custo, o resíduo gerado tem quantidades menores de impurezas quando comparados com os processos DH, HH e HDH (Matos, 2011; Mesquita, 2007; Oliveira, 2005; Junior, 2002; Oliva, 1997).

2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO FOSFOGESSO

Segundo Matos (2011), Oliveira (2005) e Junior (2002), a granulometria do fosfogesso diversifica de acordo com o processo de fabricação do ácido fosfórico, da origem geológica e mineralógica da rocha fosfática, o tempo de lixiviação do fosfogesso em depósitos e o grau de moagem da rocha durante o processo inicial de produção do ácido fosfórico. Do que diz respeito ainda sobre a granulometria, Oliveira (2014), Rufo (2009), Mesquita (2007) e Canut (2006) explicam que as dimensões das partículas de fosfogesso variam de 0,02mm a 0,05mm, com mais de 75% do total de partículas passando pela peneira n. 200 (0,074mm). Com isso os autores evidenciam que o resíduo pode apresentar, sendo em sua maior parte, um alto percentual de partículas siltosas inorgânicas de baixa plasticidade.

Por meio de ensaios laboratoriais realizados por Oliva (1997) para caracterizar fisicamente amostras de fosfogesso anidro, ele verificou que esse material, quando encontrado em seu estado natural, possui granulometria variada, com grande percentual de partículas com diâmetro de 0,02mm a 0,05mm. O fosfogesso anidro apresentou também índice de plasticidade nulo. Takeda (1998) realizou análises granulométricas em amostras de dois tipos de fosfogesso e

a partir dessa análise constatou que o fosfogesso comporta-se granulometricamente como um silte.

De acordo com as análises granulométricas feitas por Mesquita (2007), observou-se que o fosfogesso pode ser incluído na classe dos siltes, com mais de 75% de suas partículas passantes na peneira nº 200. Esse resultado mostrou-se coerente com os resultados apresentados na bibliografia. O autor constatou uma distinção das curvas granulométricas com a utilização do desfloculante como mostra a figura 5. Diante disso, conclui-se que o desfloculante age no material quebrando as ligações menores. Conseqüentemente tem-se um material mais fino (Mesquita, 2007).

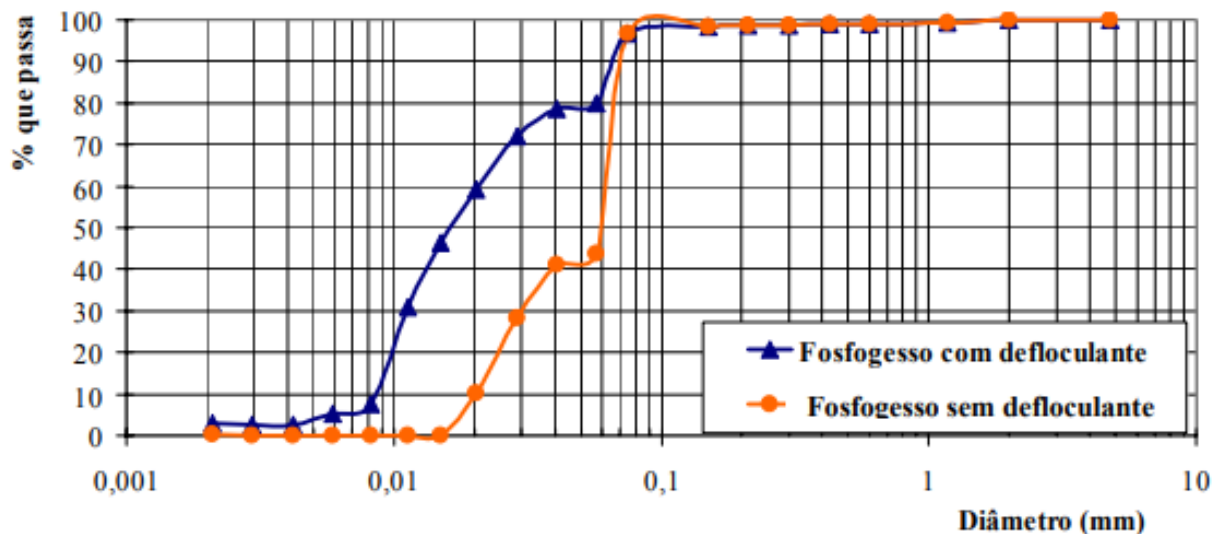


Figura 5. Curva Granulométrica do Fosfogesso com e sem desfloculante

Fonte: De “*Aplicação de Misturas de Fosfogesso e Solos Tropicais finos na Pavimentação*” de G. M. Mesquita, 2007, (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, GO, Brasil.

Segundo os ensaios realizados por Júnior (2002) chegaram às mesmas conclusões de Mesquita (2007). O autor utilizou o ensaio de granulometria conjunta (peneiramento e sedimentação) com a utilização de uma série padronizada de 7 peneiras (nº 16, 30, 50, 80, 100 e 200). Após o ensaio constatou-se, como apresentado na figura 6, que o fosfogesso pode ser incluído na classe dos siltes, com mais de 75% de suas partículas passantes na peneira nº 200.

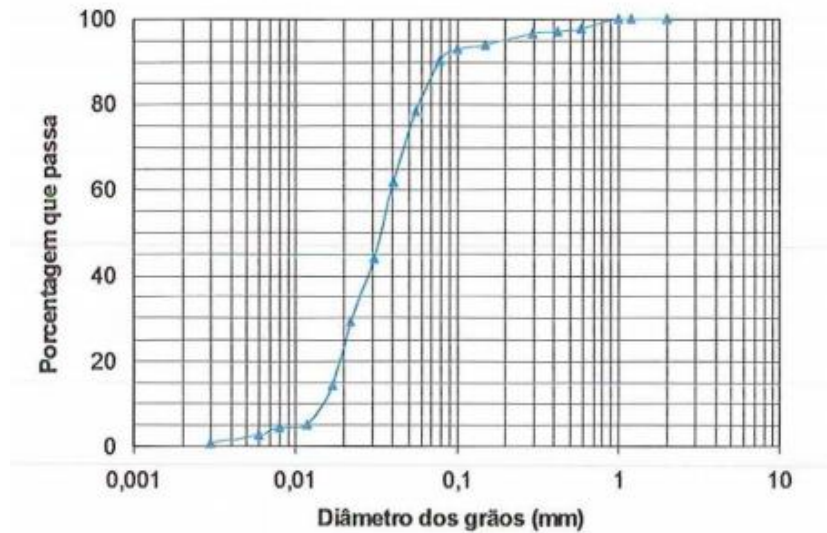


Figura 6. Distribuição Granulométria do Fosfogesso

Fonte: De “*Fosfogesso Estabilizado com Cimento para Aplicação na Construção Rodoviária – A Influência do tipo de Cimento na resistência e deformabilidade da mistura*” de O. B. S. Júnior, 2002, (Dissertação de Mestrado), Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP, Brasil.

2.5 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E MINERALÓGICAS DO FOSFOGESSO

Diversos estudos foram realizados quanto à forma das partículas de fosfogesso. Observa-se que o material tem formas e características peculiares que dependem do tipo de material encontrado nos diferentes tipos de rochas fosfáticas inseridas na fabricação do ácido fosfórico, além do processo utilizado para a obtenção do ácido fosfórico (Taha et al., 1992; Taha & Seals, 1991; Mangin, 1978 como citado em Oliveira, 2005; Oliva, 1997).

Análises mineralógicas revelam que os cristais de fosfogesso são principalmente sulfato de cálcio di-hidratado com a presença de proporções menores de outros elementos. Além disso, por meio de estudos realizados com o auxílio de microscópios óticos e eletrônicos mostraram que o fosfogesso apresenta-se na forma de aglomerado lamelar. Alguns materiais mais expostos aos efeitos de intempéries tendem a apresentar partículas mais densas e arredondadas (Taha et al., 1995, como citado em Oliveira, 2005).

A morfologia do fosfogesso apresenta quatro formas características de cristais dependentes do mineral e do processo utilizado na produção do ácido fosfórico seguindo as medidas de **L** (maior dimensão da partícula), **I** (dimensão intermediária da partícula) e, **e** (menor

dimensão ou espessura da partícula) (Mangin, 1978, como citado em Matos, 2011; Oliveira, 2005; Oliva, 1997):

- Cristais aciculares apresentam dimensões variando: **L**: 80 μm a 500 μm ; **I**: 20 μm a 100 μm ; **e**: 20 μm a 100 μm ;
- Cristais tabulares apresentam dimensões variando: **L**: 40 μm a 200 μm ; **I**: 30 μm a 150 μm ; **e**: 5 μm a 10 μm ;
- Cristais compactos: são cristais tabulares nos quais a espessura atingindo valores maiores que 10 μm ;
- Agregados policristalinos: conjunto de cristais em forma de “ouriço” e podem ser circunscritos por uma esfera de 50 μm a 100 μm de diâmetro;

As porcentagens de cada estrutura do cristal interferem nas propriedades mecânicas do fosfogesso em seu estado bruto compactado ou quando utilizado em misturas contendo solo ou materiais estabilizantes. O tamanho e o tipo de cristal formado determinam a quantidade de ácido fosfórico retida no fosfogesso durante a operação industrial de filtragem pelo processo úmido (Gregory et al., 1984 como citado em Junior, 2002).

A estrutura cristalina do fosfogesso representa em sua maior parte de cristais tabulares que correspondem, em média, a 90% do total. Em misturas estabilizadas contendo fosfogesso, os cristais podem ser encontrados no formato tabular característico e por suas faces polidas. Esses cristais de fosfogesso bruto são mais densos e amorfos em função da idade do depósito e dos processos de lixiviação (Gutti et al., 1996; Taha et al., 1995 como citado em Matos, 2011; Oliveira, 2005; Junior, 2002).

Análises microscópicas indicam que os cristais de fosfogesso hemi-hidratado apresentam dimensões geralmente menores que os encontrados no fosfogesso di-hidratado. Com isso, é possível concluir que sua morfologia é compreendida quando se conhece seu processo de fabricação, uma vez que a formação dos cristais depende das reações entre suas matérias-primas (Gadalla et al., 1990 como citado em Junior, 2002).

2.6 CARACTERÍSTICAS RADIOLÓGICAS DO FOSFOGESSO

Segundo Mazzilli et al. (2020) na rocha fosfática, as séries de decaimento U (urânio) e Th (tório) naturais estão em equilíbrio. E esse equilíbrio é rompido durante o processo industrial, e os radionuclídeos se transportam para produtos intermediários, finais e subprodutos de acordo com a solubilidade e propriedades químicas de cada elemento (Mazzilli et al., 2020).

A caracterização dos radionuclídeos nas indústrias brasileiras mostrou que os isótopos de rádio, Pb-210 (chumbo), Po-210 (polônio) e tório fracionam preferencialmente ao fosfogesso, onde os percentuais (par rocha fosfática) de 90% (isótopos de rádio), 100% (Pb-210), 78% (Po-210) e 80% (isótopos de tório) são encontrados. Os isótopos de urânio são predominantemente incorporados no ácido fosfórico como complexos de fosfato de uranila, sulfato ou fluoreto (Mazzilli et al., 2020).

No Brasil, a agência reguladora (Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN) publicou uma norma, CNEN NN 4.01, que trata da mineração e moagem de material radioativo de ocorrência natural. De acordo com essa norma a atividade da indústria de fosfato é classificada na categoria III devido aos níveis de radioatividade presentes no fosfogesso (Mazzilli et al., 2020). Portanto a utilização segura do fosfogesso requer uma avaliação do impacto radiológico das pessoas.

Mazzilli et al. (2020) estudou a exposição interna e externa em pessoas devido à irradiação gama. Essa exposição foi avaliada pela aplicação de atividade equivalente de rádio e índices de risco externo e interno de tijolos e placas de fosfogesso. A atividade equivalente de rádio foi obtida pela equação a seguir:

$$C_{Ra,eq} = C_{Ra} + 1,43C_{Th} + 0,077C_K$$

Onde:

- $C_{Ra,eq}$ são as atividades equivalentes ao rádio ($Bq Kg^{-1}$);
- C_{Ra} é a concentração de atividade de ^{226}Ra ($Bq Kg^{-1}$);
- C_{Th} é a concentração de atividade de ^{232}Th ($Bq Kg^{-1}$);
- C_K é a concentração de atividade de ^{40}K ($Bq Kg^{-1}$);

Segundo Mazzilli et al. (2020) os valores de índice 1, 1,43 e 0,077 foram definidos na hipótese de que $370 Bq Kg^{-1}$, $259 Bq Kg^{-1}$ e $4810 Bq Kg^{-1}$ para ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K produzem a mesma exposição aos raios gama.

Mazzilli et al. (2020) calculou o índice de risco externo e interno usando as equações a seguir:

$$\frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \leq 1, \text{ para exposição externa;}$$

$$\frac{C_{Ra}}{185} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \leq 1, \text{ para exposição interna;}$$

Onde:

- C_{Ra} é a concentração de atividade de ^{226}Ra ($Bq Kg^{-1}$);
- C_{Th} é a concentração de atividade de ^{232}Th ($Bq Kg^{-1}$);
- C_K é a concentração de atividade de ^{40}K ($Bq Kg^{-1}$);
- 370, 259 e 4810 são os índices de exposição externa;
- 185, 259 e 4810 são os índices de exposição interna;

De acordo com os resultados apresentados por Mazzilli et al. (2020) as placas e tijolos com fosfogesso de Cubatão e Uberaba apresentaram valores acima dos limites recomendados, como mostra a tabela 1 a seguir.

Tabela 1

Atividades equivalentes de rádio em $Bq Kg^{-1}$ ($C_{Ra,eq}$) e índices de perigo externo e interno

Amostra (tijolos/placas)	$C_{Ra,eq}$ ($Bq Kg^{-1}$)	Índices de risco	
		Externo	Interno
tijolos (Cubatão)	780	2,1	3,2
tijolos (Uberaba)	559	1,5	2,3
tijolos (Cajati)	84	0,2	0,3
placas (Cubatão)	744	2	3,1
placas (Uberada)	512	1,4	2,2
placas (Cajati)	55	0,2	0,2
limites recomendados	370	1	1

Fonte: De “Radiological implications of using phosphogypsum as buiding material: a case study of Brazil” de B. P. Mazzilli et al., 2020, *Brasilian Journal of Radiation Sciences*, 1-29.

Diante dos resultados apresentados por Mazzilli et al. (2020) sugeriu a aplicação de um cenário mais realista para a avaliação da exposição em moradias para a aplicação segura de fosfogesso como material de construção.

Mazzilli et al. (2020) construiu uma casa experimental com placas com fosfogesso advindo de lugares distintos. A casa foi toda forrada com fosfogesso e projetada para realizar uma avaliação radiológica. As placas foram fabricadas com fosfogesso de Cubatão, Cajati e Uberaba. Na casa foram construídos um quarto e banheiro com placas de fosfogesso de Cubatão e o outro quarto foi construído com placas de fosfogesso de Cajati como mostra a figura 7 a seguir.



Figura 7. Planta da casa experimental construída com placas de fosfogesso

Fonte: De “Radiological implications of using phosphogypsum as building material: a case study of Brazil” de B. P. Mazzilli et al., 2020, *Brasilian Journal of Radiation Sciences*, 1-29.

Mazzilli et al. (2020) conseguiu avaliar nesta casa os fatores de conversão de dose para a exposição externa e avaliar o incremento anual real na dose efetiva para um habitante da casa, que ficou abaixo do limite de 1mSv para todos os cenários. Os fatores de conversão de dose

teóricos derivados para essa casa em unidades de nGy por $Bq Kg^{-1}$ são 0,08 para ^{226}Ra , 0,103 para ^{232}Th e 0,00776 para ^{40}K .

De acordo com Mazzilli et al. (2020) as medições de radônio foram realizadas ao longo de um período de 18 meses, a fim de determinar os níveis médios de longo prazo das concentrações de radônio em ambientes internos. As concentrações de radônio variaram de 45 a 50 Bqm^{-3} no quarto construído com placas de gesso de Cajati e de 83 a 119 Bqm^{-3} no quarto e banheiro construído com gesso de Cubatão. Os resultados obtidos estão abaixo de 300 Bqm^{-3} , o nível de investigação recomendado para o radônio pela ICRP em residências. Deve-se observar que os resultados da concentração de radônio levaram em consideração o radônio do solo sob a construção (Mazzilli et al., 2020).

Os resultados obtidos para a concentração de radônio em residências de gesso são comparáveis à concentração de radônio em residências convencionais de material de construção (Mazzilli et al., 2020).

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen) realizou ensaios de caracterização radiológicos de cinco tipos de fosfogesso, incluindo o fosfogesso utilizado nessa pesquisa (Fosfogesso A) de lugares diferentes.

- Fosfogesso A: Catalão – GO
- Fosfogesso B: Cubatão – SP
- Fosfogesso C: Uberaba – MG
- Fosfogesso D: Cajati – SP
- Fosfogesso E: Cubatão – SP

Os ensaios levaram em consideração as seguintes misturas com a fabricação dos corpos de provas prismáticos de acordo com a ABNT NBR 13279/2005:

- Solo + 10% de Fosfogesso A
- Solo + 10% de Fosfogesso B
- Solo + 10% de Fosfogesso C
- Solo + 10% de Fosfogesso D
- Solo + 10% de Fosfogesso E

Vale ressaltar que o solo é o mesmo utilizado nessa pesquisa. Os ensaios apresentaram os seguintes resultados na tabela 2:

Tabela 2
Concentrações de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K (Bq Kg^{-1}) das amostras

Amostra	Concentração (Bq Kg^{-1})		
	226Ra	232Th	40K
Fosfогesso A	1277±39	445±14	<26
Fosfогesso B	839±25	242±8	<25
Fosfогesso C	219±7	155±5	20±5
Fosfогesso D	115±4	34±2	<15
Fosfогesso E	393±12	31±2	<19
Solo	64±2	120±6	155±23
Solo + 10% de Fosfогesso A	173±6	146±7	159±23
Solo + 10% de Fosfогesso B	131±5	134±6	147±22
Solo + 10% de Fosfогesso C	74±3	117±6	144±21
Solo + 10% de Fosfогesso D	59±2	101±5	137±20
Solo + 10% de Fosfогesso E	91±3	97±5	129±19

A partir das equações apresentadas por Mazzilli et al. (2020) e dos resultados apresentados pelo Ipen, consegue-se obter os seguintes resultados da tabela 3.

Tabela 3

Atividades equivalentes de rádio em Bq Kg^{-1} ($C_{\text{Ra,eq}}$) e índices de perigo externo e interno

Composições	$C_{\text{Ra,eq}}$ (Bq Kg^{-1})	Índices de risco	
		Externo	Interno
Fosfогesso A	1915,32	5,17	8,62
Fosfогesso B	1186,98	3,2	5,47
Fosfогesso C	442,19	1,19	1,78
Fosfогesso D	164,77	0,44	0,75
Fosfогesso E	438,79	1,18	2,24
Solo	247,53	0,66	0,46
Solo + 10% de Fosfогesso A	394,02	1,06	1,53
Solo + 10% de Fosfогesso B	333,93	0,9	1,25
Solo + 10% de Fosfогesso C	252,39	0,68	0,87
Solo + 10% de Fosfогesso D	213,97	0,57	0,73
Solo + 10% de Fosfогesso E	239,64	0,64	0,89
Limite Recomendado	370	1	1

A partir dos dados dessa tabela é possível perceber que tem-se a possibilidade de utilizar esse resíduo como matéria prima alternativa em materiais de construção. Com relação aos valores que excederam os limites recomendados, faz-se necessário aplicar em situações que estejam mais próximas da realidade como a exemplo do trabalho de Mazzilli et al. (2020).

2.7 APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO

Matos (2011) descreve que a necessidade de áreas cada vez maiores para o armazenamento das pilhas de fosfogesso acarretou o início de vários estudos sobre as possíveis aplicações deste resíduo.

2.7.1 Agricultura

Segundo Canut (2006) o fosfogesso utilizado na agricultura é denominado gesso agrícola e é usado como fonte de nutrientes para as plantas e em inúmeros processos físico-químicos no perfil do solo para condicionar e melhorar solos sódicos e argilosos. Matos (2011) explica que o fosfogesso é um material com propriedades de correção de acidez do solo. O fosfogesso possui de 15% a 16% de enxofre e 19% a 27% de sulfato de cálcio, e com a ajuda da chuva ou da irrigação, estes elementos chegam até camadas mais profundas favorecendo uma absorção eficiente e crescimento de raízes, fazendo aumentar os ganhos de produção (Matos, 2011).

De acordo com Oliveira (2005) foram realizadas em São Paulo diversas avaliações da influência do fosfogesso para as produções de soja e feijão em vários tipos de solo, mostrando que houve incremento de 28% a 37% no processo produtivo da soja, e no feijão apresentou um acréscimo de produção de 13% a 54%. O autor explica ainda que outras culturas foram estudadas relacionadas ao uso do fosfogesso como fonte de cálcio e enxofre. Esses estudos se devem pelo fato de que grande parte dos solos do Brasil tem deficiência de cálcio e enxofre (Oliveira, 2005).

Rufo (2009) aborda que há várias razões para a aplicação do fosfogesso. A principal, em nível global, é o uso em solos alcalinos com sódio em demasia. A segunda necessidade, que é relevante no Brasil, é a aplicação em solos e subsolos com características ácidas. E a terceira é a aplicabilidade no fornecimento de enxofre. Rufo (2009) e Mesquita (2007) explicam que o fosfogesso é usado na agricultura em climas áridos ou semiáridos para remover o sódio do solo.

O uso de técnicas novas de manejo do solo pode causar uma melhoria nos fatores limitantes do uso do fosfogesso para fins agrícolas. Sendo assim, têm sido desenvolvidos vários estudos sobre a aplicação desse resíduo na agricultura, verificando-se que variedades de frutas, legumes, forragem, sementes e grãos, cultivados em solo com sulfato de cálcio, apresentaram crescimento na qualidade do produto e na quantidade colhida (Oliveira, 2005).

2.7.2 Cimento

Segundo Oliveira (2005) o fosfogesso pode ser usado nas indústrias químicas, como nas de cimento, de papel, de recuperação de enxofre e também nas de ácido sulfúrico. No caso das indústrias cimenteiras, Aquino (2005) como citado em Canut (2006) fala que o consumo de fosfogesso nessas indústrias pode chegar a 1,7 milhões de toneladas anualmente.

De acordo com Canut (2006) o fosfogesso aplicado na indústria cimenteira necessita de acidez superior a 4 e um teor de ácido fosfórico inferior a 0,8%. Um pH ácido pode causar problemas nas armaduras das estruturas de concreto armado e redução da resistência inicial dos concretos. Além disso, um alto teor de ácido fosfórico aumenta o tempo de pega dos cimentos produzidos (Canut, 2006).

Damasceno (1994) como citado em Oliveira (2005) explica que o sulfato de cálcio é usado como um aditivo do Cimento Portland, com a função de controlar o tempo de pega do cimento. Com isso, este resíduo torna-se uma alternativa para o reaproveitamento, fazendo diminuir as pilhas de fosfogesso.

Por mais que seja uma oportunidade de diminuir as pilhas de fosfogesso, Canut (2006) argumenta que devido às impurezas apresentadas no fosfogesso, ele deve passar por um tratamento de purificação-beneficiamento para que se torne matéria-prima do cimento. Na fabricação do cimento, este resíduo industrial substitui a gipsita ou anidrita natural e atua como aditivo do clínquer ou retardador de pega (Canut, 2006).

2.7.3 Construção Civil

Canut (2006) e Oliveira (2005) expõem que devido ser semelhante ao gesso por suas propriedades físicas e químicas, o fosfogesso pode substituí-lo no processo de produção de placas para forro, painéis, divisórias, blocos pré-moldados, pisos e revestimentos. Mesquita (2007) também fala que o fosfogesso tem sido utilizado em alguns países na fabricação de placas, painéis, tijolos e ladrilhos destinados à construção civil, porém este resíduo necessita de purificação, que é feito por meio da calcinação e recristalização para a forma hemi-hidratada. Um exemplo é o Japão, pois devido à escassez de gipsita, o fosfogesso é naturalmente utilizado como gesso em materiais de construção (Canut, 2006).

Considerando que o setor da construção civil é indiretamente reconhecido como um dos responsáveis por problemas ambientais devidos principalmente pela quantidade de recursos naturais explorados, tem havido interesse em substituir o gesso por fosfogesso na indústria da construção, tanto como material de vedação, quanto como material de acabamento ou de revestimento interno na construção de casas populares (Villaverde, 2008).

Já é uma realidade uma casa modelo com estrutura metálica e vedação com o uso de divisórias de fosfogesso construída na Pontifícia Universidade Católica de Poços de Caldas de Minas Gerais. Nesta construção avaliaram-se todos os parâmetros relacionados às divisórias produzidas com fosfogesso, envolvendo estudos relativos à exalação de radônio até as propriedades mecânicas e físicas do material (Canut, 2006).

2.7.4 Pavimentação

De acordo com Rufo (2009) e Mesquita (2007) diversos estudos foram desenvolvidos de modo a possibilitar o uso do fosfogesso em base e sub-base de rodovias e aterros e como camada final de terraplanagem com o objetivo de melhorar as propriedades do solo, minimizar os possíveis impactos ambientais causados pela disposição e inserir no mercado um novo material.

Oliveira (2005) e Junior (2002) explicam que na pavimentação o fosfogesso é usado compactado, puro ou misturado com outros materiais como solo, areia, cal e cimento. Oliveira (2005) descreve que Oliva (1997), Takeda (1998), Parente (2002) e Júnior (2002) realizaram trabalhos utilizando este resíduo para reutilização na construção rodoviária.

Rufo (2009), Mesquita (2007) e Canut (2006) destacam um estudo feito nos Estados Unidos onde trechos de rodovias foram construídos utilizando fosfogesso. Um exemplo de sucesso de reciclagem do fosfogesso está localizado na cidade de La Porte no Texas. Testes e monitoramentos feitos no decorrer de 5 anos indicaram que o pavimento sob tráfego intenso apresenta boa capacidade de suporte utilizando misturas de fosfogesso e cimento nas proporções de 90% e 10% respectivamente (Rufo, 2009; Mesquita, 2007; Canut, 2006).

Estudos realizados por Mesquita (2007) mostraram que o fosfogesso misturado com solos finos pode ser usado na construção de aterros, camadas de reforço de subleito e até sub-base de pavimentos. Vale ressaltar que segundo a pesquisa dele não é interessante a incorporação de altos

teores de fosfogesso na mistura. Ele recomenda utilizar proporções menores que 30% devido apenas a uma questão de resistência mecânica.

2.8 FOSFOGESSO COMPACTADO

Júnior (2002) descreve que há uma grande quantidade de pesquisas relacionadas às propriedades mecânicas do fosfogesso em seu estado compactado, tais como massa específica seca, umidade ótima e resistência mecânica, com o intuito à sua utilização em obras e o uso como material de construção. O fosfogesso anidro, por exemplo, quando é compactado cria uma parcela de resistência por meio da aglutinação de suas partículas ao reagirem com água, contribuindo para a sua estabilização (Júnior, 2002).

De acordo com Júnior (2002) o fosfogesso di-hidratado compactado apresenta bons índices de resistência quando não submetido à imersão em água. Na condição imersa, o material é instável e com isso há a necessidade de utilizar estabilizantes químicos. Maccarini (1991) como citado em Júnior (2002) estudou o comportamento mecânico de um fosfogesso di-hidratado e transformando-o em anidro. Nesta pesquisa foi avaliado o fosfogesso na condição anidra e compactado na energia equivalente ao Proctor modificado.

A maioria das pesquisas mostra que o fosfogesso bruto compactado se torna viável na construção civil para a produção de tijolos, painéis e blocos, desde que sobre eles sejam aplicadas pressões de compactação estática suficiente para que o produto final tenha os requisitos mecânicos para a comercialização (Chang & Mantell, 1990; Taha & Seals, 1991 como citado em Oliveira, 2005; Júnior, 2002).

Vale ressaltar que quando o objetivo é utilizar a compactação por impacto, serve para encontrar parâmetros que são úteis na análise do emprego do fosfogesso na construção de pavimentos. Agora se o objetivo é usar a compactação estática, pretende-se analisar a incorporação desse resíduo na área da construção civil para fins de fabricação de tijolos ou painéis (Chang et al., 1989; Chang & Mantell, 1990 como citado em Oliva, 1997).

2.8.1 Relação entre Massa Específica Seca e Umidade

Oliva (1997) destaca estudos que apresentaram a relação entre massa específica seca máxima e umidade ótima, levando em consideração as energias do Proctor normal e Proctor

modificado, quando foram analisados distintos fosfogessos do estado da Flórida. Nessas pesquisas foi observado que os corpos de prova moldados para a mesma energia de compactação, empregando-se fosfogessos diferentes, mostraram resultados diferentes entre si. Notou-se que os valores da massa específica seca máxima variaram entre $1,47\text{g/cm}^3$ e $1,66\text{g/cm}^3$ e a umidade ótima entre 15% e 19,5%.

Oliva (1997) destaca também que nesse estudo mostrou que quando se usa a energia de compactação de Proctor normal, os valores da massa específica seca máxima e umidade ótima são menores quando comparadas com os valores relacionados a energia de compactação de Proctor modificado. No Brasil, Maccarini (1991) como citado em Oliva (1997) utilizou fosfogesso di-hidratado com energia de compactação de Proctor modificado, e os valores da massa específica seca máxima variaram de $1,45\text{g/cm}^3$ a $1,47\text{g/cm}^3$, com teor de umidade de 28%.

2.8.2 Resistência à Compressão Simples

Rufo (2009) explica que o ensaio de compressão simples é realizado em corpos de provas mediante aplicação de carga axial, com controle de deformação. Os ensaios realizados por Rufo (2009) foram separados amostras de solo, fosfogesso e as misturas de solo-fosfogesso e solo-cal. Os resultados obtidos foram comparados, avaliando-se a possibilidade de uso desses materiais em camadas de pavimentos flexíveis.

Em um experimento realizado por Maccarini (1991) como citado em Oliveira (2005) foi avaliado a evolução do crescimento da resistência à compressão simples em tempos de cura de até 50 horas. Os resultados exibem que o tempo de cura de 8 horas forneceu ao fosfogesso quase a totalidade de sua resistência, com sua metade sendo alcançada em 2 horas.

Chang et al. (1989) e Chang e Mantell (1990) como citado em Oliva (1997) realizaram ensaios de resistência à compressão simples empregando fosfogesso di-hidratado de diferentes localizações utilizando métodos de compactação estático e por impacto. Segundo eles, as amostras de fosfogesso compactadas são parecidas ao de solos compactados, quando analisado sob o ponto de vista de energia de compactação. Isso quer dizer que quanto mais elevada é a energia de compactação, maior é o valor da resistência à compressão simples.

3 MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA

3.1 Caracterização da Pesquisa

A metodologia empregada é quantitativa por meio de uma pesquisa experimental com abordagem exploratória. Martins e Theóphilo (2009) explicam que o responsável pela pesquisa experimental pode controlar as variáveis cujos efeitos desejam estudar. Explicam também que uma das características básicas de uma pesquisa experimental é ter uma variável independente (variável a ser manipulada – solo e fosfogesso) e uma variável dependente (variável que se observam as consequências da manipulação – resultados dos ensaios).

3.2 Procedimentos Experimentais

O solo utilizado foi disponibilizado pela Universidade Nove de Julho (Uninove) e os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e no Laboratório de Materiais de Construção Civil da própria instituição.

E por ser um solo sem classificação, para sua caracterização foram utilizados os ensaios de análise granulométrica e os índices de consistência de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 7181/2018, ABNT NBR 6459/2017 e ABNT NBR 7180/2016, respectivamente. Após os ensaios, o solo foi classificado pelo Sistema Unificado da Classificação dos Solos (SUCS).

No caso do fosfogesso, o material, que foi doado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), encontrava-se em sacos plásticos vedados na forma di-hidratada. Antes de sua utilização, o fosfogesso passou por um processo de secagem em estufa na temperatura de 100°C por 24 horas. Além disso, as amostras foram preparadas de acordo com a ABNT NBR 6457/2016.

Após a classificação, foram conduzidos ensaios de compactação com energia normal para cada uma das misturas (Solo mais 0% de fosfogesso, solo + 4% de fosfogesso e solo + 7% de fosfogesso) de acordo com a ABNT NBR 7182/2016 para fins de descobrir a densidade aparente seca e a umidade ótima das misturas em estudo. Para justificar a escolha da composição dessas misturas, foi por meio de ensaios preliminares que identificou um aumento da resistência até a utilização de 4% de fosfogesso no solo, e que a partir da composição com 5% de fosfogesso, têm-se uma tendência de queda nas resistências.

Por meio de parâmetros determinados, foram compactados corpos de prova cilíndricos respeitando-se a relação H (altura) = $2 \times D$ (diâmetro). Em seguida foram moldados cinco

corpos de prova prismáticos com dimensões de 4cm x 4cm x 16cm para cada uma das misturas, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 13279/2005. Posteriormente, estes foram levados à queima em mufla a 900°C por 96 horas. Os corpos de prova passaram por ensaios de resistência à compressão simples e tração na flexão, tal como recomendado pela ABNT NBR 13279/2005.

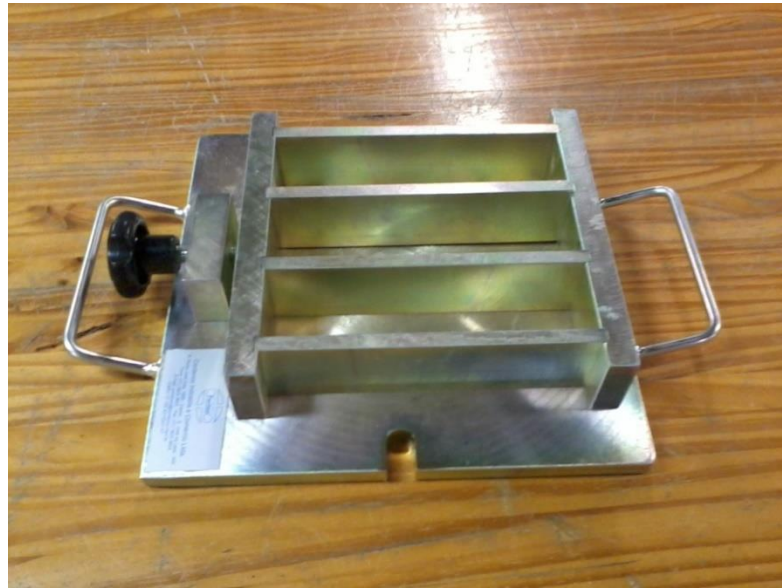


Figura 8. Moldes prismáticos para ensaios.

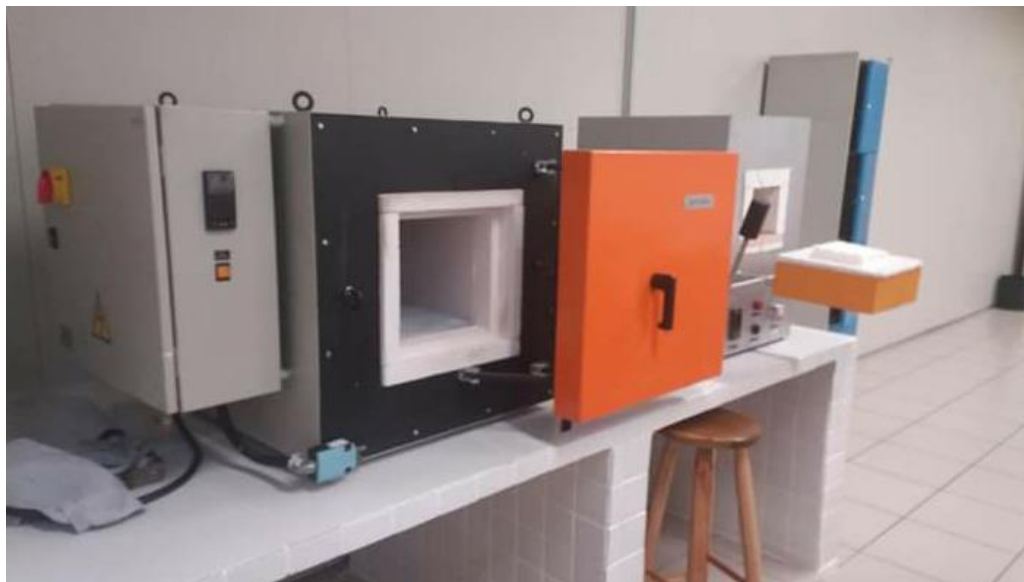


Figura 9. Mufla.

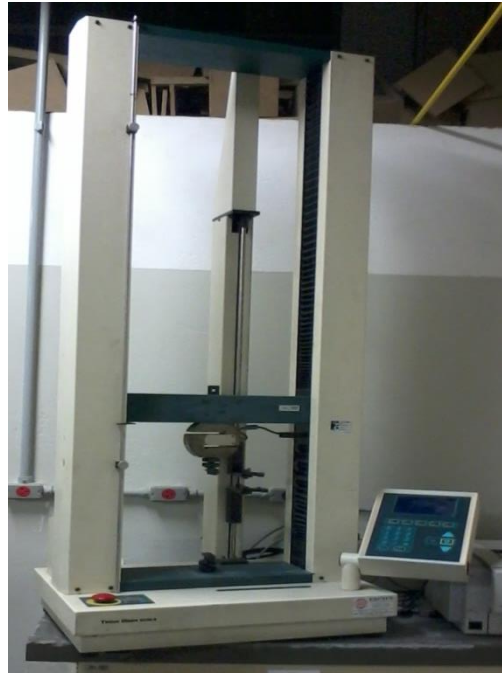


Figura 10. Máquina de ensaios de tração na flexão e compressão

Para fins de média, foram feitos três ensaios de compactação do solo e para cada processo foi utilizado 2500g do material. Já no processo de compactação com o fosfogesso, têm-se as seguintes configurações: Para solo com 4% de fosfogesso foram usados 2400g de solo e 100g de fosfogesso, e para solo com 7% de fosfogesso foram usados 2325g de solo e 175g de fosfogesso.

Para a análise dos resultados foram considerados três grupos. Sendo eles um grupo-controle (solo mais 0% de fosfogesso) e dois grupos experimentais (solo mais 4% de fosfogesso e solo mais 7% de fosfogesso).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

O solo é classificado como fino, pois de acordo com a curva granulométrica, a porcentagem de peso passante na peneira n. 200 é mais de 50%. Levando em consideração os ensaios dos índices de consistência, o limite de liquidez atingiu valor de 52 (Desvio padrão = 6,67; Coeficiente de variação = 12,07). O índice de plasticidade resultou em 29% (Desvio padrão = 6,01; Coeficiente de variação = 25,60). Portanto, de acordo com a classificação SUCS (Sistema de Classificação Universal de Solo), o material em questão pode ser classificado como uma argila de alta compressibilidade (CH). A seguir são apresentados os resultados obtidos.

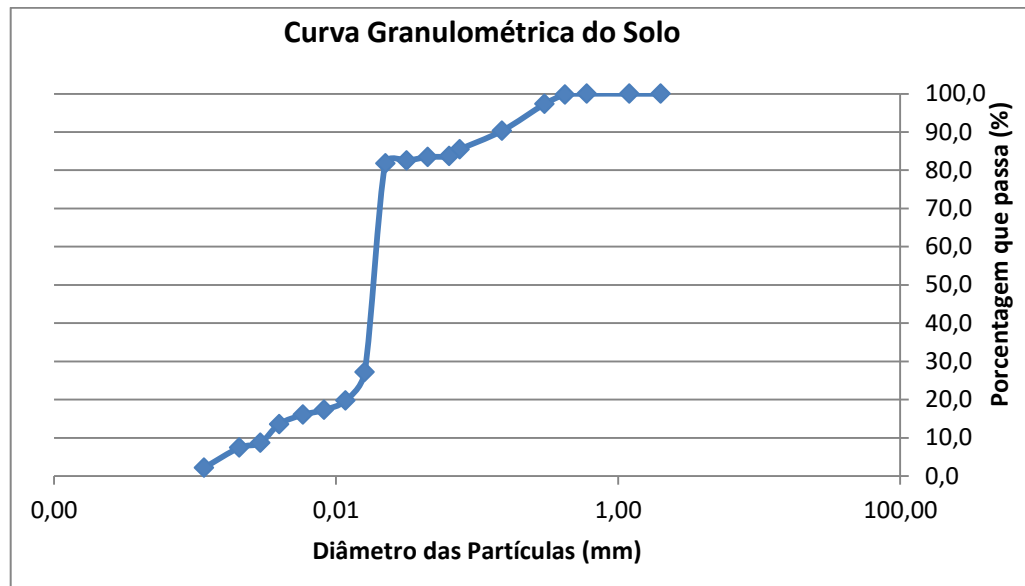


Figura 11. Curva Granulométrica do Solo.

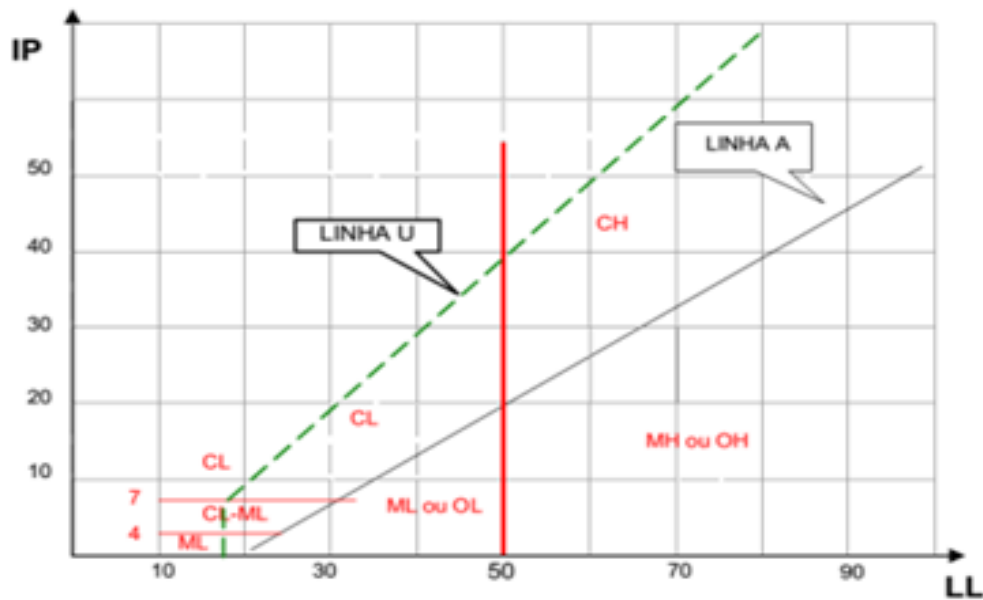


Figura 12. Gráfico de Plasticidade

Para as amostras sem adição de fosfogesso, foram feitos três ensaios de compactação para fins de média. Os resultados encontrados para a densidade aparente seca e umidade ótima foram: 14,92kN/m³ e 27,4%, 15,19kN/m³ e 26,5% e 14,81kN/m³ e 28,9%, respectivamente. A partir disso têm-se as médias: 14,97kN/m³ e 27,6%.

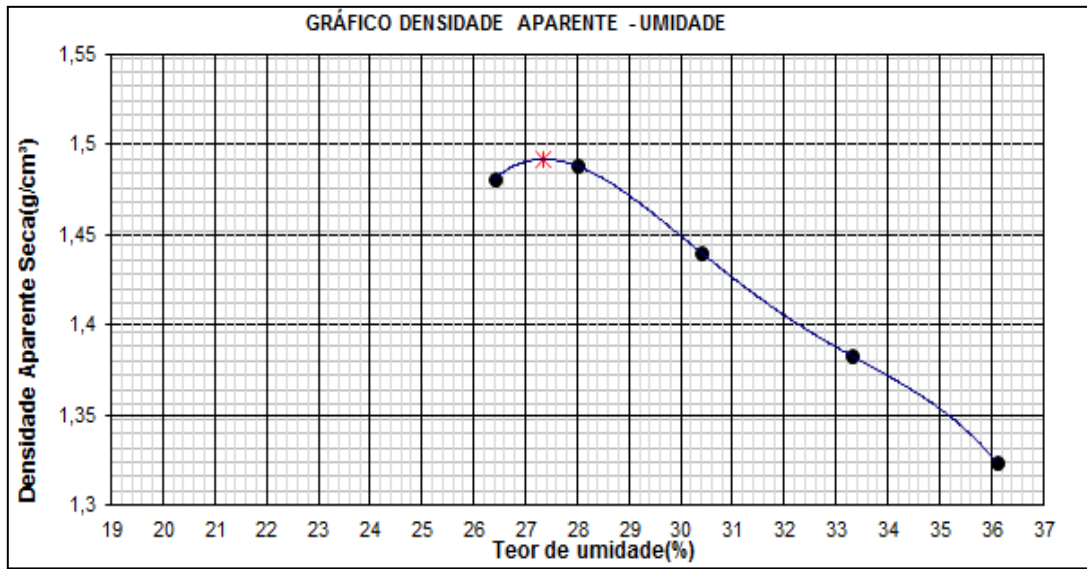


Figura 13. Ensaio 1 de Compactação do solo

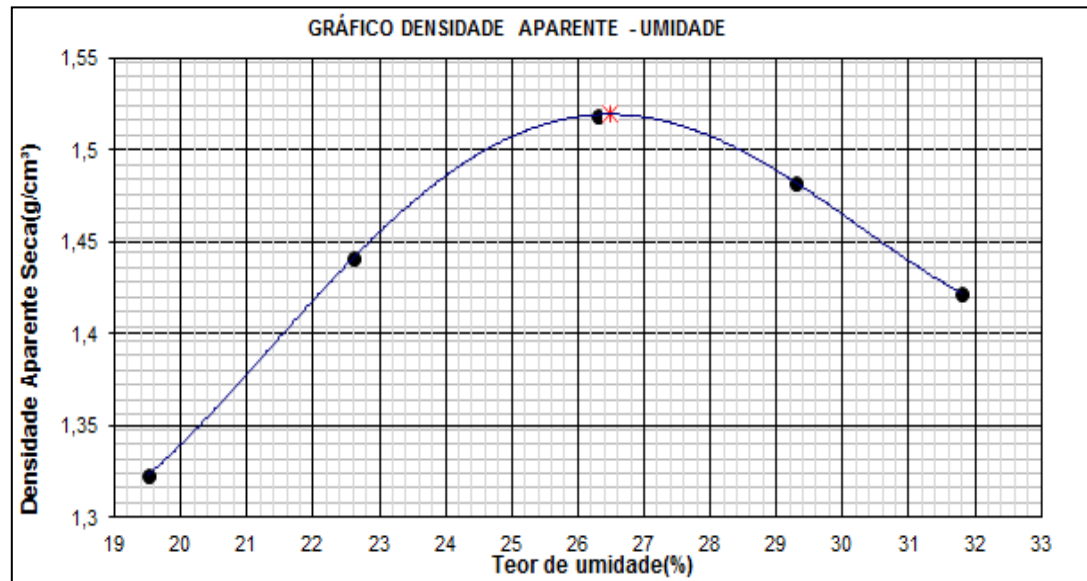


Figura 14. Ensaio 2 de Compactação do solo

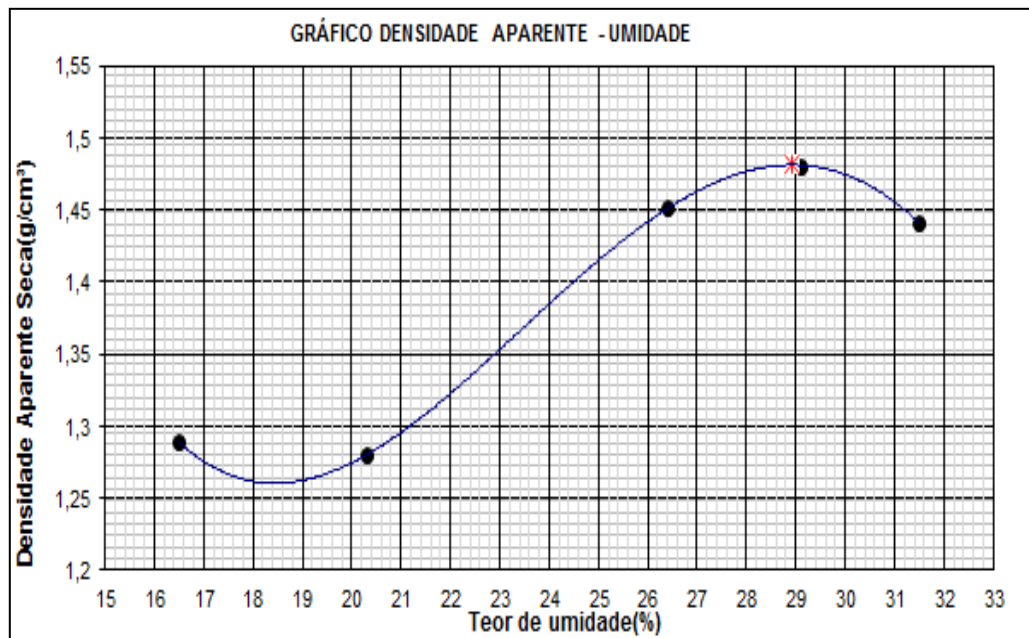


Figura 15. Ensaio 3 de Compactação do solo

Para as amostras com adição de 4% e 7% de fosfogesso no solo, a densidade aparente seca e a umidade ótima apresentaram os seguintes resultados: 14,82kN/m³ e 27% e 14,82kN/m³ e 25,5%, respectivamente.

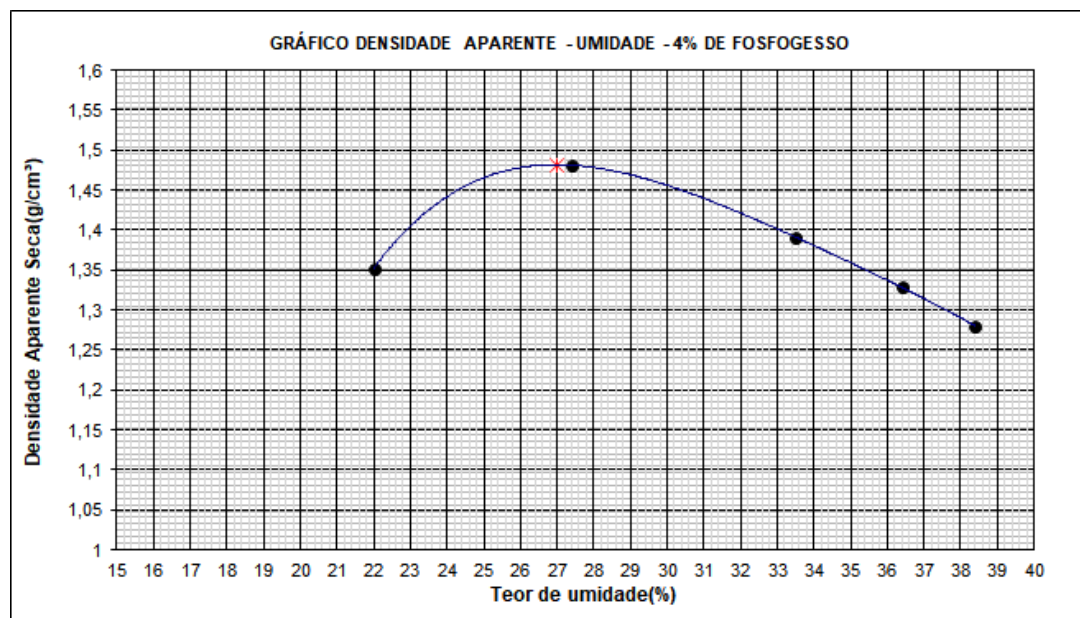


Figura 16. Ensaio de Compactação (4% de Fosfogesso)

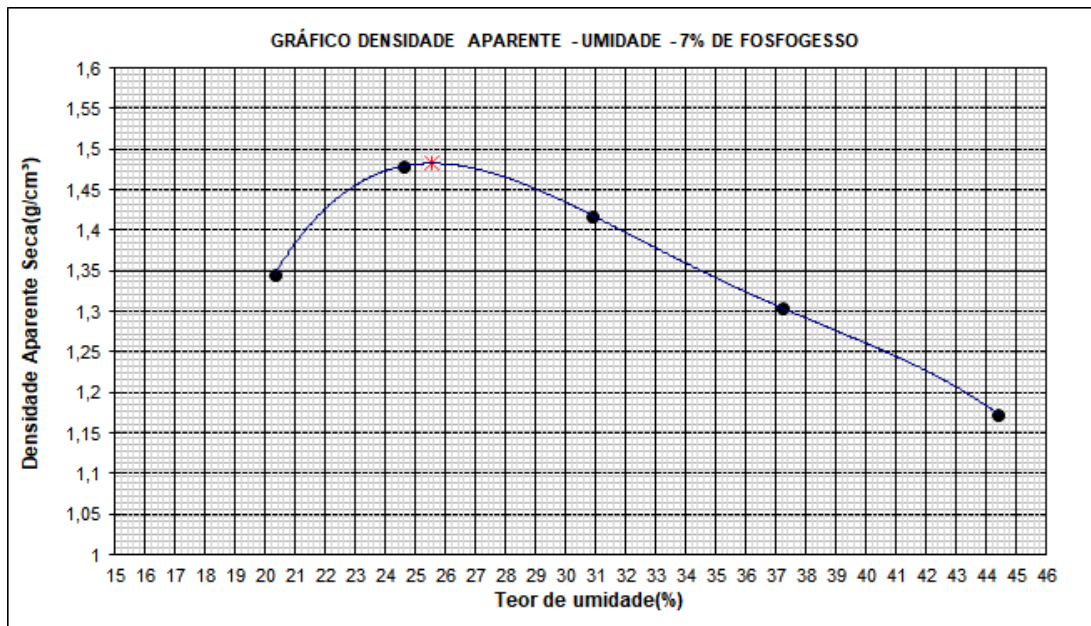


Figura 17. Ensaio de Compactação (7% de Fosfogesso)

Para os ensaios de compressão simples e tração na flexão, foram moldados cinco corpos de prova prismáticos para cada mistura para fins de média ilustrados a seguir.



Figura 18. Moldagem dos corpos de prova



Figura 19. Corpos de Prova

Os corpos de prova A1, A2, A3, A4 e A5 são de amostras sem adição de fosfogesso. Já os corpos de prova B1, B2, B3, B4 e B5 e C1, C2, C3, C4 e C5 são de amostras com concentrações de 4% e 7% de fosfogesso, respectivamente.

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A primeira análise tem por objetivo determinar a resistência à tração na flexão dos corpos de prova a partir de diferentes concentrações de fosfogesso. Para esse estudo serão utilizados os seguintes dados:

Tabela 4

Valores de resistência à flexão obtidos por meio dos ensaios

Resistência à tensão na flexão		Tração na Flexão (MPa)									
Nº de Amostras	%	Espécime 1					Espécime 2				
		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
5	0	A1	0,72	A2	0,65	A3	0,87	A4	0,85	A5	0,74
5	4	B1	0,76	B2	0,82	B3	0,73	B4	0,57	B5	0,53
5	7	C1	0,41	C2	0,40	C3	0,30	C4	0,46	C5	0,40

Na tabela 5 são apresentadas as médias, desvios padrão, erros padrão, intervalos de confiança e máximos e mínimos.

Tabela 5

Análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios de tração à flexão

	N	Média (MPa)	Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de confiança de 95% para a média (MPa)		Mínimos (MPa)	Máximos (MPa)
					Limite Inferior	Limite superior		
					0% de Fosfogesso	5		
4% de Fosfogesso	5	0,68	0,12	0,05	0,52	0,83	0,53	0,82
7% de Fosfogesso	5	0,39	0,05	0,02	0,32	0,46	0,30	0,46
Total	15	0,60	0,18	0,04	0,50	0,70	0,30	0,87

Segundo Field (2009) o erro padrão é o desvio padrão da distribuição amostral desses dados. Assim, para os corpos de prova com nenhuma concentração de fosfogesso, se for retirado muitas amostras da população da qual esses dados vieram, as médias dessas amostras terão desvio padrão de 0,05. Para as concentrações com 4% e 7% de fosfogesso os valores são 0,05 e 0,02, respectivamente (Field, 2009).

Por meio da figura 20 a seguir, é possível observar pelo diagrama de médias que os valores têm uma tendência de queda quando se aumenta a concentração de fosfogesso. Essa queda se torna mais acentuada para os corpos de prova com concentrações de 7% de fosfogesso. No caso das concentrações com 0% para 4% de fosfogesso, a queda da resistência à tração na flexão não é muito acentuada.

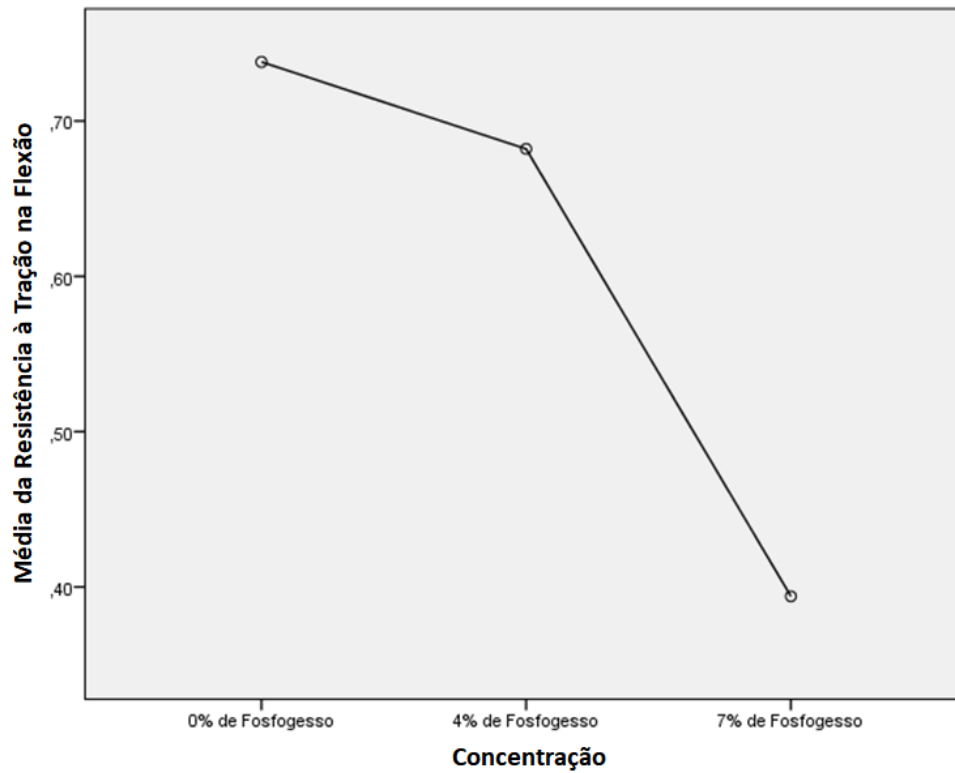


Figura 20. Diagrama de Médias

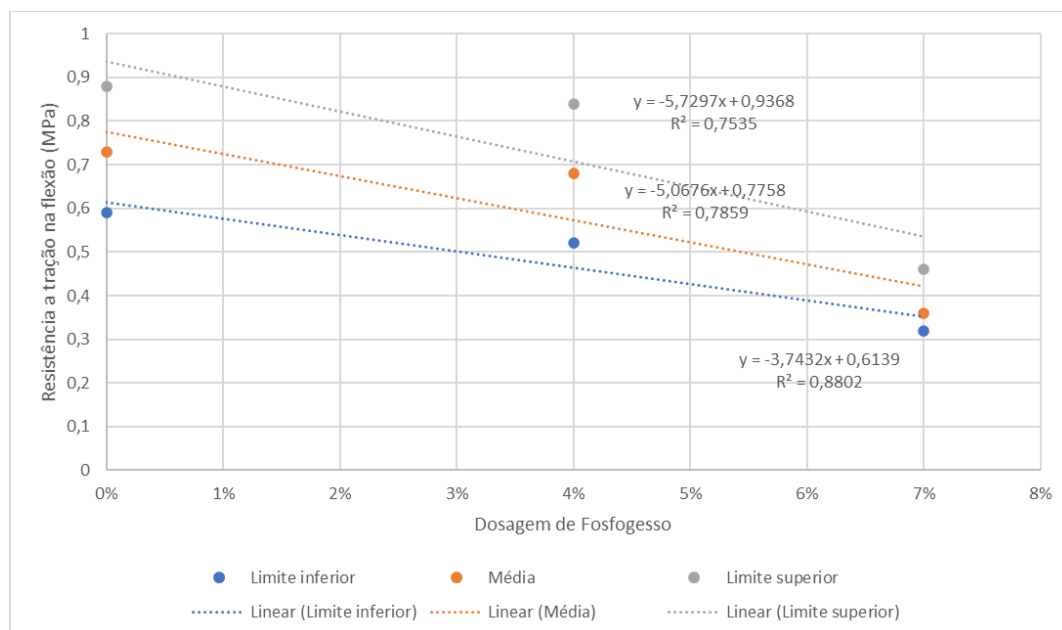


Figura 21. Gráfico de correlação linear entre dosagem e resistência à tração.

De acordo com a figura 21, a resistência à tração na flexão tem uma tendência de queda à medida que a concentração de fosfogesso aumenta. Para comprovar essa tendência de queda, faz-se necessário utilizar uma técnica denominada análise de variância (ANOVA), pois informa como as variáveis interagem umas com as outras e que efeitos essas interações apresentam (Field, 2009).

Depois da análise descritiva, é necessário verificar se os dados deste estudo fazem parte de uma distribuição normal. Segundo Field (2009) fazer essa análise apenas observando histogramas é uma opção, porém sua análise é subjetiva e não informam sobre a distribuição estar próxima o suficiente da normalidade.

Uma maneira de tratar esse problema é ver se a distribuição como um todo se desvia de uma distribuição normal modelo. Para isso são feitos os testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk, esses testes comparam escores de uma amostra a uma distribuição normal modelo da mesma média e variância dos valores encontrados na amostra (Field, 2009). A análise de normalidade dos dados é apresentada na tabela 6 a seguir:

Tabela 6
Testes de Normalidade

	Concentration	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estatística	gl	Sig.	Estatística	gl	Sig.
Resistência	0% de Fosfogesso	0,23	5	0.20	0.91	5	0,46
	4% de Fosfogesso	0,25	5	0.20	0.90	5	0,42
	7% de Fosfogesso	0,34	5	0.06	0.87	5	0,29

Ao observar os valores de significância é possível perceber que os testes são não significativos ($p > 0,05$), ou seja, os dados da amostra não diferem significativamente de uma distribuição normal (Field, 2009).

Outro teste importante é o da homogeneidade da variância, pois vai dizer se os dados são homogêneos ou heterogêneos. Esse teste verifica se à medida que se avança entre os níveis de uma variável, a variância da outra não deve mudar (variâncias homogêneas). Isso significa que a variância de uma variável deve ser a mesma em cada grupo. Muitos procedimentos estatísticos são utilizados para fazer esse teste, porém como este trabalho usa grupos de dados, a tendência é utilizar o teste de Levene como mostrado na tabela 7 (Field, 2009).

Tabela 7
Teste de Homogeneidade de Variância

		Estadística Levene	gl1	gl2	Sig.
Resistência	Com base na média	3,57	2	12	0,06
	Com base na mediana	1,46	2	12	0,27
	Com base na mediana e com gl ajustado	1,46	2	9,55	0,28
	Com base na média aparada	3,59	2	12	0,06

O teste de Levene verifica se as variâncias dos grupos são as mesmas, ou seja, a diferença entre as variâncias é zero. Dessa forma, se o teste de Levene é significativo quando $p \leq 0,05$ pode-se concluir que as variâncias são significativamente diferentes. No entanto, se o teste de Levene não é significativo ($p > 0,05$), pode-se concluir que as diferenças entre as variâncias é zero (Field, 2009). De acordo com os dados da tabela 7, todos os valores de significância são maiores que 0,05, com isso as diferenças entre as variâncias é zero, ou seja, são variâncias homogêneas.

A partir dos dados apresentados pela análise exploratória (Teste de Normalidade e Teste de Homogeneidade da Variância) é possível realizar uma análise de variância (ANOVA), pois segundo Field (2009) a ANOVA tem as mesmas características de testes paramétricos, uma vez que os dados fazem parte de uma distribuição normal e as variâncias em cada uma das condições experimentais devem ser homogêneas. Diante disso segue a análise de variância.

Tabela 8
Análise de variância dos dados obtidos: ANOVA

		Soma dos quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.	
Entre Grupos	(Combinado)	0,34	2	0,17	15,29	0,001	
	Termo Linear	Contraste	0,29	1	0,29	26,55	0,000
		Desvio	0,04	1	0,04	4,02	0,068
	Termo Quadrático	Contraste	0,04	1	0,04	4,02	0,068
Dentro de grupos		0,13	12	0,01			
Total		0,47	14				

A tabela 8 apresenta o resumo da ANOVA principal. Ela é dividida em efeitos entre grupos que segundo Field (2009) são efeitos devidos ao modelo (efeito experimental) e efeitos dentro dos grupos, que é a variação assistemática dos dados (Field, 2009). O efeito entre os grupos é dividido nas componentes linear e quadrática, esses componentes fazem parte da análise

de tendência. É importante ressaltar que uma tendência quadrática é utilizada quando tiver no mínimo três grupos (Field, 2009).

No efeito entre grupos denominado Combinado (Combined) é o efeito experimental geral. Nessa linha são informadas as somas dos quadrados do modelo ($SS_M = 0,34$). Os graus de liberdade são iguais a 2 e os quadrados médios do modelo é igual a 0,17. Segundo Field (2009) a soma dos quadrados e as médias dos quadrados representam o efeito experimental. No efeito dentro dos grupos fornece detalhes da variação assistemática dentro dos dados, ou seja, quanta variação assistemática existe (soma dos quadrados dos resíduos – $SS_R = 0,13$). Além disso, a tabela 6 mostra também a média dos quadrados dos quadrados dos resíduos ($MS_R = 0,01$) (Field, 2009).

Outro dado importante é a razão F para efeitos entre grupos combinados. O valor dessa razão é 15,29. Ao levar em consideração a coluna final rotulada Sig. Mostra a probabilidade da ocorrência de uma razão F obtida por acaso. Neste caso existe uma probabilidade de 0,001 de que a razão F tenha ocorrido por acaso (uma chance de 0,1%). Em virtude de esse valor ser menor que 0,05, pode-se dizer que existe um efeito significativo do fosfogesso. Todavia não se sabe exatamente quais grupos estão diferindo (Field, 2009).

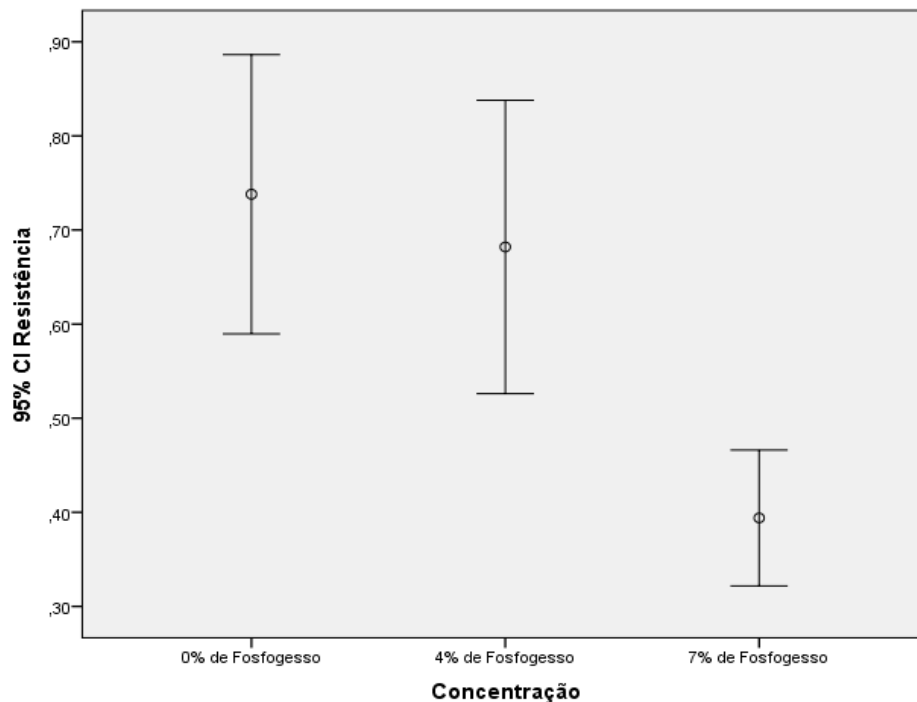


Figura 22. Diagrama de Barras de Erro

Ao verificar o diagrama de barras de erro apresentado na figura 22 é possível perceber uma diferença do grupo com 7% de fosfogesso para com os outros grupos. Segundo Field (2009) quando as barras de erro se sobrepõem consideravelmente significa que os grupos possuem muitos valores similares. Agora, quando as barras de erro não se sobrepõem, indica uma diferença significativa entre os grupos.

Field (2009) explica que a razão F apenas informa que existe uma diferença entre os grupos, porém não indicam quais grupos diferem entre si. Portanto, após a realização da ANOVA precisam-se executar análises adicionais para descobrir quais grupos diferem entre si. Desse modo, é necessário encontrar uma maneira de comparar os diferentes grupos sem ocorrer erro do Tipo I. Uma opção é utilizar comparações planejadas (contrastes planejados), e outra opção é por meio de testes post hoc.

Segundo Field (2009) a diferença entre comparações planejadas e testes post hoc é que as comparações planejadas são feitas quando se tem hipóteses específicas para serem testadas, ao passo que os testes post hoc são feitos quando não tem hipóteses específicas. Como essa pesquisa não tem o intuito de testar hipóteses são feitos testes post hoc.

Testes post hoc consistem em comparações em pares planejados para comparar todas as diferentes combinações dos grupos sendo testados. Contudo, as comparações em pares controlam o erro de conjunto corrigindo o nível de significância de cada teste de forma que o erro do Tipo I total ao longo de todas as comparações permaneça ao nível especificado (0,05) (Field, 2009).

A escolha dos procedimentos de comparações múltiplas vai depender da situação em que estiver, e o mais importante é manter um controle restrito sobre o erro de conjunto ou ter um grande poder estatístico. Quando o tamanho das amostras é igual, utiliza-se o teste de Tukey e REGWT, que estão incluídos no software SPSS, pois ambos têm um bom controle sobre o erro do tipo I. Quando houver dúvidas quanto à igualdade das variâncias populacionais, é indicado que utilize o procedimento de Games-Howell, pois oferece melhor desempenho (Field, 2009). Para os dados da resistência à tração na flexão são utilizados o teste de Tukey e REGWT e para checar os resultados com o procedimento de Games-Howell.

Tabela 9
Testes Post Hoc: Tukey HSD e Games-Howell

	(I) Concentração	(J) Concentração	Diferença média (I-J) (MPa)	Erro Padrão	Sig.	Intervalo de confiança de 95% (MPa)	
						Limite Inferior	Limite superior
Tukey HSD	0% de Fosfogesso	4% de Fosfogesso	0,05	0,06	0,68	-0,12	0,23
		7% de Fosfogesso	0,34	0,06	0,00	0,16	0,52
	4% de Fosfogesso	0% de Fosfogesso	-0,05	0,06	0,68	-0,23	0,12
		7% de Fosfogesso	0,28	0,06	0,00	0,10	0,46
	7% de Fosfogesso	0% de Fosfogesso	-0,34	0,06	0,00	-0,52	-0,16
		4% de Fosfogesso	-0,28	0,06	0,00	-0,46	-0,10
Games- Howell	0% de Fosfogesso	4% de Fosfogesso	0,05	0,07	0,75	-0,16	0,27
		7% de Fosfogesso	0,34	0,05	0,00	0,15	0,52
	4% de Fosfogesso	0% de Fosfogesso	-0,05	0,07	0,75	-0,27	0,16
		7% de Fosfogesso	0,28	0,06	0,01	0,09	0,48
	7% de Fosfogesso	0% de Fosfogesso	-0,34	0,05	0,00	-0,52	-0,15
		4% de Fosfogesso	-0,28	0,06	0,01	-0,48	-0,09

A tabela 9 mostra os resultados dos testes de Tukey e do procedimento de Games-Howell. Para cada par de grupos, a diferença entre as médias dos grupos é apresentada assim como o erro padrão, o nível de significância e um intervalo de 95% de confiança para essa diferença.

Na primeira comparação do teste de Tukey (0% de fosfogesso com 4% de fosfogesso) revela uma diferença não significativa ($p > 0,05$), porém quando se faz a comparação do grupo de 0% de fosfogesso com o grupo de 7% de fosfogesso existe uma diferença significativa ($p < 0,05$). Neste caso é possível concluir que a resistência à tração na flexão não tem uma mudança significativa quando aumenta-se a concentração de 0% para 4% de fosfogesso. Além disso, é possível perceber também que ao aumentar a concentração de fosfogesso de 0% para 7% de fosfogesso, a resistência à tração na flexão tem uma mudança significativa.

Depois dessa comparação entre o grupo de controle com os grupos experimentais, o teste de Tukey informa o resultado da comparação entre os grupos experimentais (4% de fosfogesso com 7% de fosfogesso). Neste caso percebe-se uma diferença significativa. Com isso a diferença entre os grupos localiza-se entre os grupos de 0% e 4% de fosfogesso com o grupo de 7% de

fosfogesso. O restante da tabela descreve o procedimento de Games-Howell que é uma inspeção e revela o mesmo padrão dos resultados: a diferença se encontra no grupo de 7% de fosfogesso para com os outros grupos.

Tabela 10
Subconjuntos homogêneos

	Concentração	N	Subconjunto para alfa = 0,05 (MPa)	
			1	2
Tukey HSD	7% de Fosfogesso	5	0,39	
	4% de Fosfogesso	5		0,68
	0% de Fosfogesso	5		0,73
	Sig.		1,00	0,68
Ryan-Einot-Gabriel- Welsch Range	7% de Fosfogesso	5	0,39	
	4% de Fosfogesso	5		0,68
	0% de Fosfogesso	5		0,73
	Sig.		1,00	0,41

A tabela 10 mostra os resultados do teste de Tukey e o REGWQ. Esses testes mostram subconjuntos de grupos que tem a mesma média. Portanto o teste de Tukey cria dois subconjuntos de grupos com médias estatisticamente semelhantes (Field, 2009). No primeiro subconjunto contém apenas o grupo com concentração de 7% de fosfogesso, e o segundo subconjunto contém os grupos com concentração de 0% e 4% de fosfogesso.

Esses resultados indicam que os grupos com concentração de 0% e 4% de fosfogesso possuem médias semelhantes, porém o grupo com concentração de 7% de fosfogesso não possui média semelhante para com os outros grupos. Em outras palavras, as médias dos grupos de 0% e 4% de fosfogesso são significativamente diferentes quando comparadas com o grupo de 7% de fosfogesso. Além disso, o teste fornece um valor de significância para cada subconjunto, e a partir desses valores é perceptível que os grupos nos subconjuntos não têm médias significativas ($p > 0,05$).

O próximo passo é calcular o tamanho de efeito. Segundo Field (2009) quando se mede o tamanho de um efeito, seja ele se uma manipulação experimental ou a força de relacionamento entre variáveis é simplesmente uma medida de magnitude padronizada do efeito observado. Field

(2009) recomenda a utilização do coeficiente r de correlação de Pearson como uma medida objetiva do tamanho do efeito, pois se limita a um intervalo entre 0 (sem efeito) e 1 (efeito perfeito). Tamanhos de efeitos são úteis porque eles dão uma medida objetiva de importância de um efeito (Field, 2009). Cohen (1988, 1992) como citado em Field (2009) estipula o que é um efeito pequeno ou grande:

- $r = 0,10$ (efeito pequeno): nesse caso o efeito explica 1% da variância total.
- $r = 0,30$ (efeito médio): o efeito é responsável por 9% da variância total.
- $r = 0,50$ (efeito grande): o efeito é responsável por 25% da variância total.

Vale ressaltar que r não é medido numa escala linear, assim, um efeito com $r = 0,6$ não é duas vezes maior do que um com $r = 0,3$. A utilidade da estimativa do tamanho do efeito é tamanha que a American Psychological Association (APA) recomenda que informe o efeito nos resultados de qualquer trabalho publicado (Field, 2009).

Pode-se calcular o tamanho de efeito por meio do r^2 utilizando o efeito entre grupos (SS_M) e a quantidade total de variância nos dados (SS_T) (Field, 2009):

$$r^2 = \frac{SS_M}{SS_T}$$

$$r^2 = \frac{0,34}{0,47}$$

$$r^2 = 0,7194$$

$$r = \sqrt{0,7194}$$

$$r = 0,85$$

De acordo com Field (2009) essa medida do tamanho do efeito é levemente tendenciosa porque é baseada nas somas dos quadrados da amostra e nenhum ajuste é feito para o fato de que se tenta estimar o tamanho de efeito na população. Portanto, muitas vezes utiliza-se uma medida denominada ômega quadrado (ω^2). Essa estimativa ainda é baseada nas somas dos quadrados, porém ela usa a variância explicada pelo modelo e o erro da variância, ou seja, é uma medida mais precisa.

$$\omega^2 = \frac{SS_M - (gl_M)MS_R}{SS_T + MS_R}$$

$$\omega^2 = \frac{0,34 - 2 \cdot 0,01}{0,47 - 0,01}$$

$$\omega^2 = \frac{0,319}{0,463}$$

$$\omega^2 = 0,68898$$

$$\omega = \sqrt{0,68898}$$

$$\omega = 0,83$$

Diante dos resultados dessa primeira análise, existe um efeito significativo do fosfogesso nos níveis de resistência à tração na flexão, $F(2,12) = 15,29$, $p < 0,05$, $\omega = 0,83$.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (SEM MUFLA E COM MUFLA)

4.3.1 Resistência à compressão sem mufla (não submetidos à queima em mufla)

Para a análise da resistência à compressão (sem mufla) serão utilizados os seguintes dados:

Tabela 11

Dados obtidos dos ensaios de compressão dos corpos de prova não queimados

Nº de Amostras	%	Compressão Sem Mufla (MPa)									
		Espécime 1		Espécime 2		Espécime 3		Espécime 4		Espécime 5	
5	0	A1	4,30	A2	3,20	A3	4,30	A4	3,80	A5	2,60
5	4	B1	3,00	B2	3,00	B3	3,20	B4	2,80	B5	2,60
5	7	C1	2,80	C2	2,60	C3	2,30	C4	2,50	C5	2,10

Na tabela 12 são apresentadas as médias, desvios padrão, erros padrão, intervalos de confiança e máximos e mínimos.

Tabela 12

Análise estatística dos dados obtidos – Análise descritiva

	N	Média (MPa)	Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de confiança de 95% (MPa)		Mínimos (MPa)	Máximos (MPa)
					Limite Inferior	Limite Superior		
					0% de Fosfogesso	5		
4% de Fosfogesso	5	2,92	0,22	0,10	2,63	3,20	2,60	3,20
7% de Fosfogesso	5	2,46	0,27	0,12	2,12	2,79	2,10	2,80
Total	15	3,00	0,66	0,17	2,63	3,37	2,10	4,30

A tabela 12 apresenta os dados da estatística descritiva da resistência à compressão (sem mufla – corpos de prova secos em sombra).

No caso dos intervalos de confiança, é provável que as médias da população das concentrações com 0%, 4% e 7% de fosfogesso estejam entre 2,72MPa e 4,55MPa (0%), 2,63MPa e 3,20MPa (4%) e 2,12MPa e 2,79MPa (7%), respectivamente.

É possível perceber pelo diagrama de médias apresentado na figura 23, que os valores têm uma tendência de queda à medida que se aumenta a concentração de fosfogesso. Essa queda é acentuada quando eleva a concentração de fosfogesso. Diante disso é possível afirmar que as resistências diferem entre si.

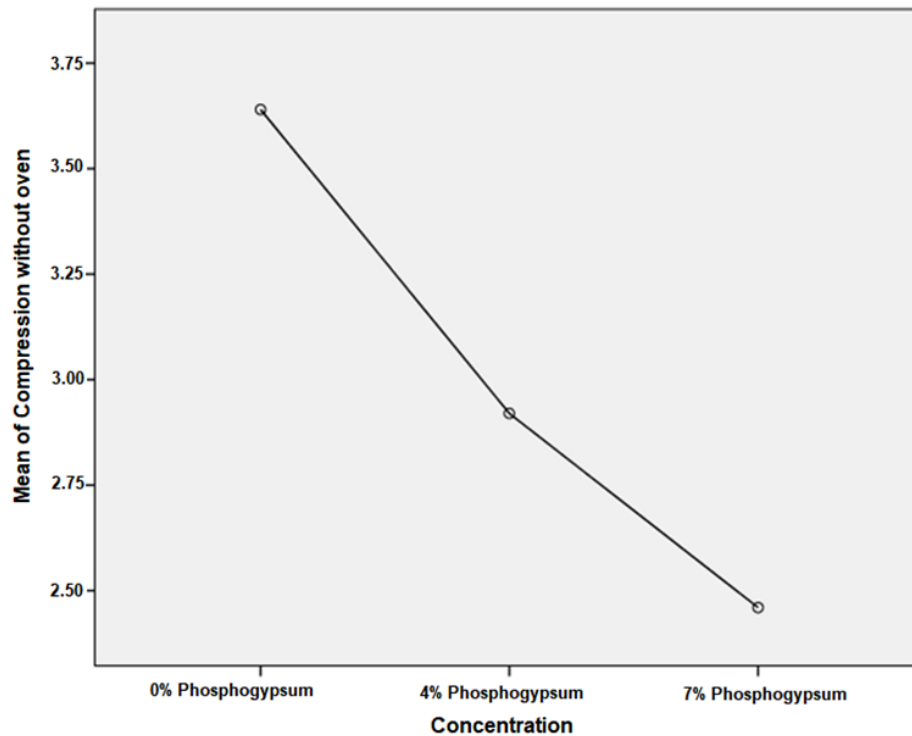


Figura 23. Diagrama de Médias

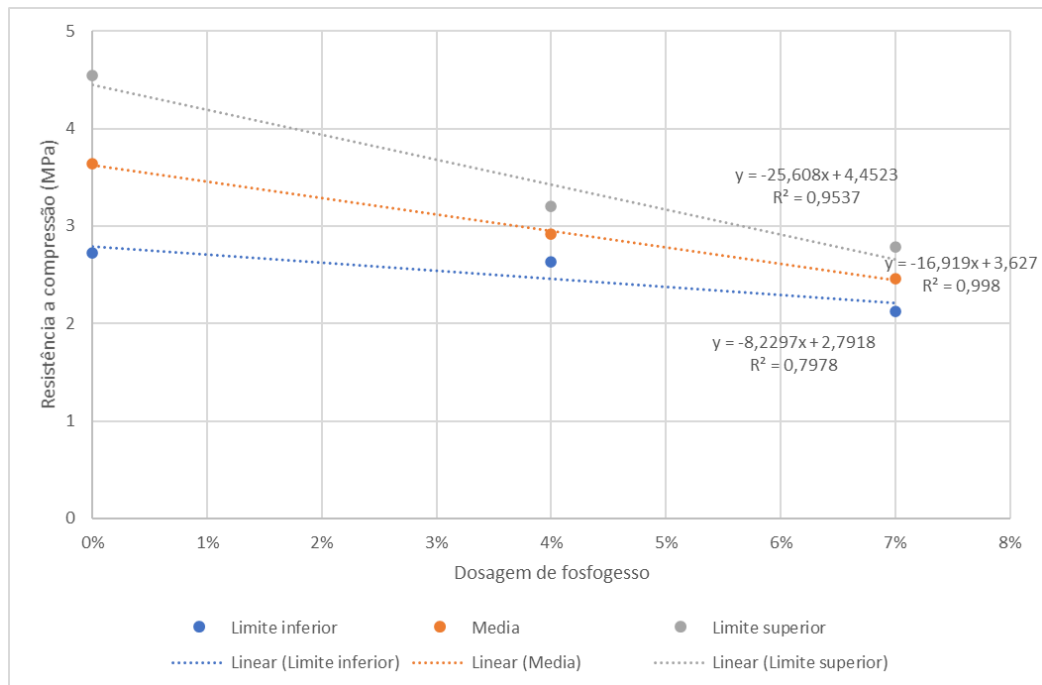


Figura 24. Correlação linear obtida entre dosagem de fosfogesso e resistência à compressão.

De acordo com a figura 24, a resistência à compressão sim sem mufla tem uma tendência de queda à medida que a concentração de fosfogesso aumenta.

Para a verificação da normalidade dos dados, foram conduzidos os testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk. Os valores são apresentados na tabela 13.

Tabela 13
Teste de Normalidade

Concentração	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estatística	gl	Sig.	Estatística	gl	Sig.
0% de Fosfogesso	0,21	5	0,20	0,89	5	0,39
Resistência 4% de Fosfogesso	0,23	5	0,20	0,96	5	0,81
7% de Fosfogesso	0,15	5	0,20	0,99	5	0,98

Ao observar os valores de significância da tabela 10 é possível perceber que os testes são não significativos ($p > 0,05$), ou seja, os dados da amostra não diferem significativamente de uma distribuição normal (Field, 2009).

Após o teste de normalidade foi conduzido o teste de homogeneidade das variâncias. Os resultados são apresentados a seguir:

Tabela 14
Teste de Homogeneidade de Variância

		Estatística Levene	gl1	gl2	Sig.
Resistência	Com base na média	5,86	2	12	0,01
	Com base na mediana	3,08	2	12	0,08
	Com base na mediana e com gl ajustado	3,08	2	6,38	0,11
	Com base na média aparada	5,46	2	12	0,02

De acordo com os dados da tabela 11 o teste de Levene apresenta significâncias com base na média e com base na média aparada menores que 0,05, isso quer dizer que as variâncias são significativamente diferentes.

Por mais que os dados da tabela 13 sejam normalmente distribuídos, esses dados apresentam heterogeneidade de variância na tabela 14. Com isso, algumas medidas podem ser tomadas, e neste caso a ANOVA independente de um fator tem uma contraparte não paramétrica chamada teste Kruskal-Wallis. Esse teste ajuda a contornar esse tipo de problema (Field, 2009).

Testes não paramétricos são conhecidos como testes de distribuição livre, pois fazem poucas suposições sobre o tipo de dado que pode ser utilizado. Esses testes trabalham com a ideia de categorizar os dados: encontrar o menor valor e atribuir a ele um posto (posição) 1, achar o próximo maior valor e atribuir a ele o posto 2 e assim sucessivamente. A análise é feita sobre os postos em vez dos dados observados. Esse processo é uma forma de utilizar dados que não se encaixam nas hipóteses paramétricas (Field, 2009).

Tabela 15
Postos

	Concentração	N	Média dos Postos
Resistance	0% de Fosfogesso	5	11,70
	4% de Fosfogesso	5	8,60
	7% de Fosfogesso	5	3,70
	Total	15	

Tabela 16
Estatísticas Teste

Resistência	
Qui-Quadrado	8,25
Gl	2
Sig. Assint.	0,016

A tabela 15 mostra um resumo dos postos dos dados para cada condição. Já a tabela 16 mostra a estatística H para o teste de Kruskal-Wallis (Qui-Quadrado), seu grau de liberdade e a significância. É importante observar que o valor da significância é 0,016. Como esse valor é menor que 0,05, pode-se concluir que a concentração de fosfogesso afeta significativamente a resistência à compressão (sem mufla) (Field, 2009). Uma forma de ver qual grupo difere é por meio do diagrama de caixas, tal como apresentado a seguir:

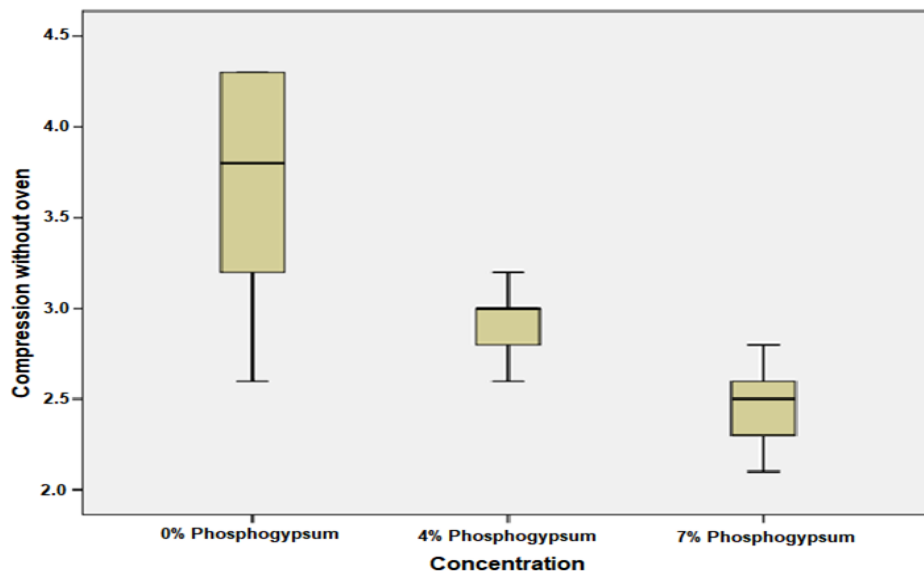


Figura 25. Diagrama de Caixas

Por meio dos valores das medianas dos grupos apresentados na figura 25, as concentrações com 0%, 4% e 7% de fosfogesso diferem entre si, entretanto, a mediana do grupo com nenhuma concentração de fosfogesso apresenta uma diferença maior quando comparada aos demais grupos. Diante disso, talvez a diferença esteja entre o grupo com nenhuma concentração de fosfogesso e os grupos com 4% e 7% de fosfogesso. Segundo Field (2009) essas conclusões são subjetivas, e para isso tem a necessidade de testes post hoc.

De acordo com Field (2009) uma das maneiras de realizar procedimentos post hoc não paramétricos é por meio de testes de Mann-Whitney. Contudo quando se utiliza esse teste existe o risco de ocorrer erro do tipo I, e por esse motivo o autor recomenda não começar realizando muitos testes Mann-Whitney. Diante disso é possível realizar vários testes de Mann-Whitney em

seguida a um teste de Kruskal-Wallis desde que seja realizado algum ajuste para que o erro do tipo I não ultrapasse o valor de 0,05 (Field, 2009).

A forma mais fácil é utilizando a correção de Bonferroni, que na sua forma mais simples significa que em vez de utilizar um valor crítico de 0,05 para cada teste, usa-se o valor de 0,05 dividido pelo número de testes que será feito. Se esse procedimento é realizado o valor da significância torna-se tão pequeno que poderá ocasionar problemas. Dessa forma o autor recomenda ser bem seletivo nas comparações realizadas. Para essa segunda análise são feitos dois testes:

- Teste 1: Grupo com concentração de 4% de fosfogesso com o grupo com nenhuma concentração de fosfogesso;
- Teste 2: Grupo com concentração de 7% de fosfogesso com o grupo com nenhuma concentração de fosfogesso;

Assim, em vez de utilizar 0,05 como o valor crítico, usa-se $\frac{0,05}{2} = 0,025$ (nova significância).

Tabela 17
Testes Post Hoc para Teste Kruskal-Wallis

Comparação (0% e 4% de fosfogesso)		Comparação (0% e 7% de fosfogesso)	
Estatísticas Teste		Estatísticas Teste	
	Resistência		Resistência
U de Mann-Whitney	5,00	U de Mann-Whitney	1,50
W de Wilcoxon	20,00	W de Wilcoxon	16,00
Z	-1,58	Z	-2,31
Sig. Assint. (Bilateral)	0,11	Sig. Assint. (Bilateral)	0,02
Sig. Exata [2*(Sig. Unilateral)]	0,15	Sig. Exata [2*(Sig. Unilateral)]	0,01

Com a nova significância de 0,025, na tabela 17 a única comparação significativa é a daqueles corpos de prova com concentração de 7% de fosfogesso com o grupo de corpos de prova com concentração de 0% de fosfogesso (o valor da significância observada foi de 0,01, que é menor do que 0,025). No caso da outra comparação, produz um valor de significância maior do que 0,025, ou seja, não são significativas.

Desso modo, o efeito que se obtém parece refletir principalmente o fato de que concentrações de 7% de fosfogesso no solo refletem na resistência à compressão (sem mufla) quando comparado ao grupo com nenhuma concentração de fosfogesso no solo. Todavia ao

adicionar uma concentração de 4% de fosfogesso no solo parece não afetar a resistência à compressão (sem mufla) quando comparado ao grupo com 0% de fosfogesso.

O próximo teste a ser feito é o teste para a tendências denominado teste de Jonckheere-Terpstra. Essa estatística testa se as medianas seguem algum padrão de ordenação. Esse teste faz o mesmo que o teste de Kruskal-Wallis, porém incorpora informações sobre se a ordem dos grupos tem alguma tendência. Utiliza-se essa estatística quando espera que os grupos sendo comparados tenham algum padrão específico com as medianas (Field, 2009).

Tabela 18
Teste de Tendência: Teste Jonckheere-Terpstra (Teste Estatístico J)

	Resistance
Número de Níveis de Concentração	3
N	15
Estatística J-T Observada	8,50
Estatística J-T Média	37,50
Desvio Padrão de J-T	9,39
Estatística J-T Padronizada	-3,08
Sig. Assint. (Bilateral)	0,00

Na tabela 18 mostra o número de grupos sendo comparados, que são 3. Apresenta também o valor da estatística J, que é 8,50. Informa também a média e o desvio padrão com os valores de 37,50 e 9,39, respectivamente. Sabendo desses valores é possível converter a estatística teste para o escore-z, que nesse caso vale: $z = \frac{(8,50-37,50)}{9,39} \rightarrow z = -3,08$ (Field, 2009). Esse valor de 3,08 é significativo. Além disso, o valor-z informa a ordem das medianas. Se for positivo, as medianas estão em uma ordem crescente, porém se for negativo, como é o caso desse teste, as medianas estão em ordem decrescente. Neste caso, à medida que se aumenta a concentração de fosfogesso, a resistência à compressão (sem mufla) diminui (Field, 2009).

Após os resultados para o teste de tendência, são calculados os tamanhos de efeitos. Segundo Field (2009) explica que é importante relatar o tamanho do efeito de forma que as pessoas tenham uma medida padronizada do valor que foi observado. A equação que converte um escore-z em uma estimativa do tamanho de efeito é representado pela seguinte equação:

$$r = \frac{Z}{\sqrt{N}}$$

Onde z é o escore- z e N é o tamanho dos valores do estudo (total de observações realizadas) na qual z foi baseado.

Field (2009) sugere que seja calculado o tamanho de efeito para os testes de Mann-Whitney que foi utilizado para acompanhar a análise principal. Para as comparações têm-se os seguintes valores do tamanho de efeito:

$$r_{0\% \text{ vs. } 4\%} = \frac{-1,58}{\sqrt{15}}$$

$$r_{0\% \text{ vs. } 4\%} = -0,41$$

$$r_{0\% \text{ vs. } 7\%} = \frac{-2,31}{\sqrt{15}}$$

$$r_{0\% \text{ vs. } 7\%} = -0,60$$

Para a primeira comparação ($r_{0\% \text{ vs. } 4\%}$) representa um efeito médio. Já para a segunda comparação ($r_{0\% \text{ vs. } 7\%}$) representa um efeito grande. Esses valores representam uma descoberta significativa (Field, 2009).

Pode-se calcular também o tamanho de efeito para o teste de Jonckheere-Terpstra. Para isso pode-se também utilizar a mesma equação (Field, 2009):

$$r_{\text{Jonckheere}} = \frac{-3,08}{\sqrt{15}}$$

$$r_{\text{Jonckheere}} = -0,80$$

Diante dos resultados dessa segunda análise a resistência à compressão (sem mufla) foi significativamente afetada pela concentração de fosfogesso ($H(2) = 8,25$, $p < 0,05$). Testes de Mann-Whitney foram utilizados para acompanhamento desse achado. Uma correção de Bonferroni foi aplicada e todos os efeitos foram testados no nível de 0,025. Percebe-se que a resistência à compressão (sem mufla) não apresentou diferenças com concentração de 4% de fosfogesso ($U = 5,00$, $r = -0,41$) quando comparado com concentração de 0% de fosfogesso.

Contudo quando as concentrações de 7% de fosfogesso foram observadas, a resistência à compressão (sem mufla) foi significativamente menor quando comparada com concentrações de 0% de fosfogesso ($U = 1,50$, $r = -0,60$). Com isso conclui-se que concentrações de 0% e 4% de

fosfogesso não apresentam diferenças significativas, ou seja, as resistências à compressão (sem mufla) têm valores semelhantes. Agora quando comparado com concentrações de 7% de fosfogesso os valores são significativamente menores.

Já o teste de Jonckheere-Terpstra revelou uma tendência significativa nos dados de que quanto maior é a concentração, a resistência à compressão (sem mufla) dos corpos de prova decresce, $J = 8,50$, $z = -3,08$, $r = -0,80$.

4.3.2 Resistência à compressão com mufla (submetidos à queima em mufla)

Para a análise da resistência à compressão (com mufla) serão utilizados os seguintes dados:

Tabela 19

Dados obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão

		Resistência à compressão com Mufla									
Nº de Amostras	%	Compressão Com Mufla (MPa)									
		Espécime 1		Espécime 2		Espécime 3		Espécime 4		Espécime 5	
5	0	A1	11,90	A2	11,50	A3	13,80	A4	15,40	A5	12,00
5	4	B1	13,30	B2	13,30	B3	17,30	B4	12,30	B5	12,40
5	7	C1	6,00	C2	4,60	C3	3,90	C4	4,30	C5	5,40

Na tabela 20 são apresentadas as médias, desvios padrão, erros padrão, intervalos de confiança e máximos e mínimos.

Tabela 20

Análises estatísticas conduzidas – Análise descritiva

	N	Média (MPa)	Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de confiança de 95% (MPa)		Mínimos (MPa)	Máximos (MPa)
					Limite Inferior	Limite Superior		
					0% de Fosfogesso	5		
4% de Fosfogesso	5	13,72	2,05	0,92	11,16	16,27	12,30	17,30
7% de Fosfogesso	5	4,86	0,88	0,39	3,76	5,95	3,90	6,10
Total	15	10,50	4,40	1,13	8,06	12,93	3,90	13,30

A tabela 20 apresenta os dados da estatística descritiva da resistência à compressão (com mufla). Para os corpos de prova com concentrações de 0%, 4% e 7% de fosfogesso. No caso dos intervalos de confiança, é provável que as médias da população das concentrações com 0%, 4% e 7% de fosfogesso estejam entre 10,87MPa e 14,96MPa (0%), 11,16MPa e 16,27MPa (4%) e 3,76MPa e 5,96MPa (7%), respectivamente.

É possível observar pelo diagrama de médias mostrados na figura 26 que os valores têm uma tendência de queda quando se aumenta a concentração de fosfogesso. Essa queda se torna mais acentuada para os corpos de prova com concentrações de 7% de fosfogesso. Por mais que exista uma tendência de queda, no caso das concentrações com 0% para 4% de fosfogesso tem um leve crescimento da resistência à compressão (com mufla), o que faz pensar que esses valores podem vir a ser iguais.

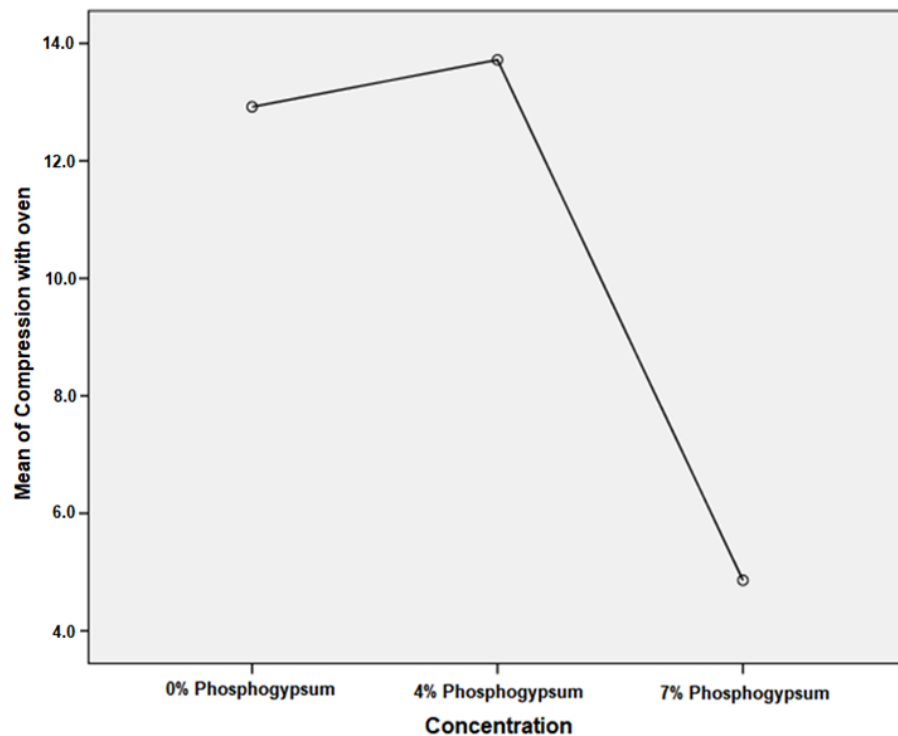


Figura 26. Diagrama de Médias

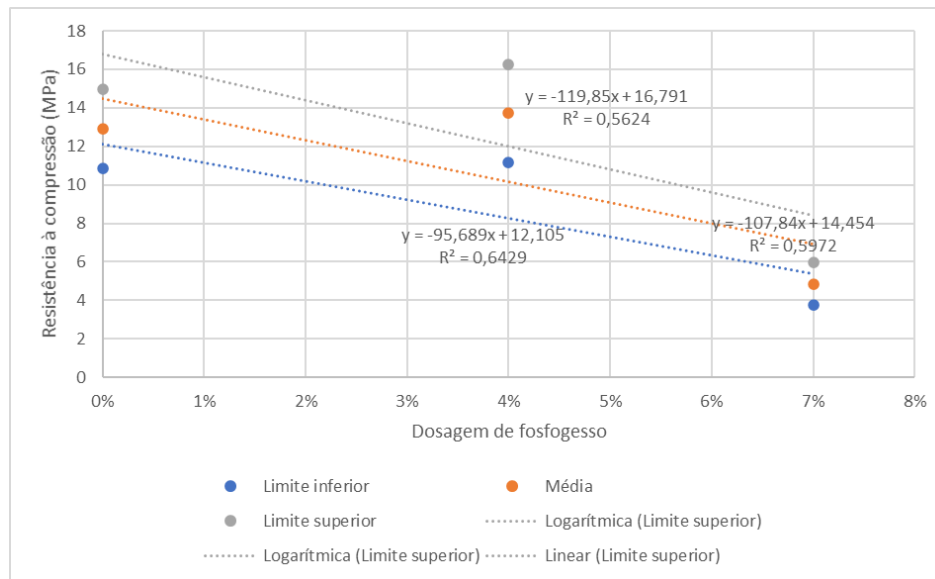


Figura 27. Correlação linear entre dosagem de fosfogesso e resistência à compressão.

De acordo com a figura 27 a resistência à compressão simples com mufla tem uma tendência de queda à medida que a concentração de fosfogesso aumenta. Os testes de normalidade conduzidos nos dados obtidos são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 21
Teste de Normalidade

Concentração	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estatística	gl	Sig.	Estatística	gl	Sig.
0% de Fosfogesso	0,31	5	0,12	0,85	5	0,22
Resistência 4% de Fosfogesso	0,38	5	0,01	0,74	5	0,02
7% de Fosfogesso	0,21	5	0,20	0,95	5	0,75

Ao observar os valores de significância na tabela 21 é possível perceber que o teste da resistência à compressão (com mufla) com concentração de 4% de fosfogesso tem significância menor que 0,05. Diante disso a distribuição é significativamente diferente de uma distribuição normal (Field, 2009).

Após o teste de normalidade é feito o teste da homogeneidade da variância.

Tabela 22
Teste de Homogeneidade de Variância

		Estadística Levene	gl1	gl2	Sig.
Resistência	Com base na média	1,02	2	12	0,39
	Com base na mediana	0,25	2	12	0,77
	Com base na mediana e com gl ajustado	0,25	2	8,88	0,78
	Com base na média aparada	0,78	2	12	0,47

De acordo com os dados da tabela 22 o teste de Levene apresenta significâncias maiores que 0,05. Isso quer dizer que as diferença entre as variâncias é zero (variâncias homogêneas).

Por mais que os dados da tabela 22 tenham variâncias homogêneas, na tabela 21 apresentam dados que não são normalmente distribuídos. Com isso, algumas medidas podem ser tomadas, e neste caso a ANOVA independente de um fator tem uma contraparte não paramétrica chamada teste Kruskal-Wallis. Esse teste ajuda a contornar esse tipo de problema (Field, 2009).

Tabela 23
Postos

		Concentração	N	Média dos Postos
Resistência		0% de Fosfogesso	5	9,60
		4% de Fosfogesso	5	11,40
		7% de Fosfogesso	5	3,00
		Total	15	

Tabela 24
Estatísticas Teste

		Resistência
Qui-Quadrado		9,79
GI		2
Sig. Assint.		0.007

A tabela 23 mostra um resumo dos postos dos dados para cada condição. Já a tabela 24 mostra a estatística H para o teste o teste de Kruskal-Wallis (Qui-Quadrado), seu grau de liberdade e a significância. É importante observar que o valor da significância é 0,007. Como esse valor é menor que 0,05, pode-se concluir que a concentração de fosfogesso afeta

significativamente a resistência à compressão (com mufla) (Field, 2009). Uma forma de ver qual grupo difere é por meio do diagrama de caixas.

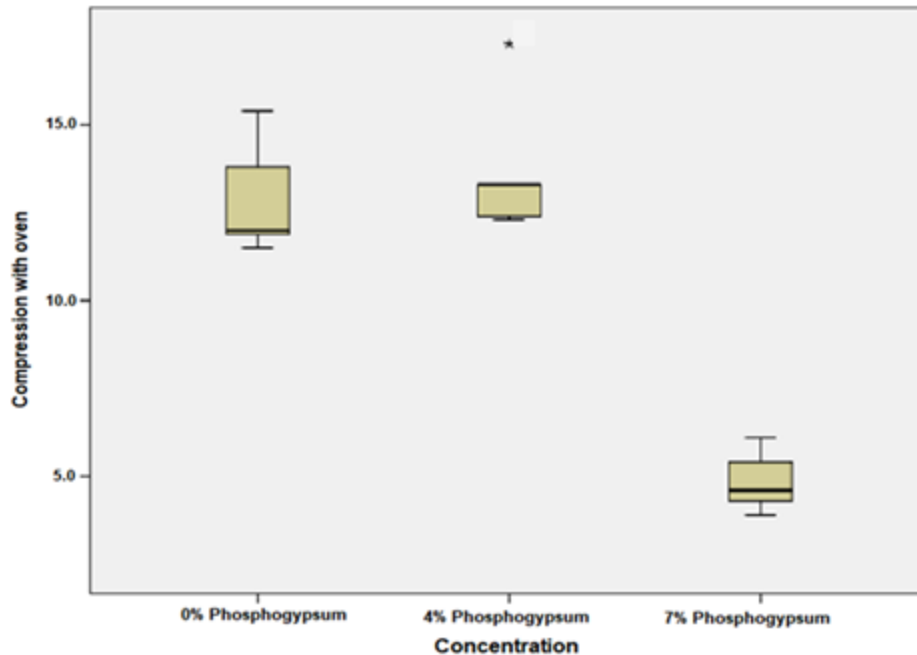


Figura 28. Diagrama de Caixas

A partir dos valores das medianas dos grupos apresentados na figura 28, as concentrações de 0% e 4% de fosfogesso parecem iguais, porém são diferentes quando comparado com o grupo com concentração de 7% de fosfogesso. Talvez haja igualdade entre os grupos de 0% e 4% de fosfogesso, e parecem diferentes do grupo com 7% de fosfogesso. Outra informação importante é que nos corpos de prova com 4% de fosfogesso geraram um valor atípico de resistência representado pelo asterisco (*). De acordo com Field (2009) essas conclusões são subjetivas, e para isso tem a necessidade de testes post hoc. Para essa terceira análise são feitos dois testes:

- Teste 1: Grupo com concentração de 4% de fosfogesso com o grupo com nenhuma concentração de fosfogesso;
- Teste 2: Grupo com concentração de 7% de fosfogesso com o grupo com nenhuma concentração de fosfogesso;

Assim, em vez de utilizar 0,05 como o valor crítico, usa-se $\frac{0,05}{2} = 0,025$ (nova significância).

Tabela 25
Testes Post Hoc para Teste Kruskal-Wallis

Comparação (0% e 4% de fosfogesso)		Comparação (0% e 7% de fosfogesso)	
Estatísticas Teste		Estatísticas Teste	
	Resistência		Resistência
U de Mann-Whitney	8,00	U de Mann-Whitney	0,00
W de Wilcoxon	23,00	W de Wilcoxon	15,00
Z	-0,94	Z	-2,61
Sig. Assint. (Bilateral)	0,34	Sig. Assint. (Bilateral)	0,009
Sig. Exata [2*(Sig. Unilateral)]	0,42	Sig. Exata [2*(Sig. Unilateral)]	0,008

Com a nova significância de 0,025, na tabela 25, a única comparação significativa é a daqueles corpos de prova com concentração de 7% de fosfogesso com o grupo de corpos de prova com concentração de 0% de fosfogesso (o valor da significância observada foi de 0,008, que é menor do que 0,025). No caso da outra comparação, produz um valor de significância maior do que 0,025, ou seja, não são significativas.

Desso modo, o efeito que se obtém parece refletir principalmente o fato de que concentrações de 7% de fosfogesso no solo refletem na resistência à compressão (com mufla) quando comparado ao grupo com nenhuma concentração de fosfogesso no solo. Todavia ao adicionar uma concentração de 4% de fosfogesso no solo parece não afetar a resistência à compressão (com mufla) quando comparado ao grupo com 0% de fosfogesso.

O próximo teste a ser feito é o teste para a tendência denominado teste de Jonckheere-Terpstra. Essa estatística testa se as medianas seguem algum padrão de ordenação. Esse teste faz o mesmo que o teste de Kruskal-Wallis, porém incorpora informações sobre se a ordem dos grupos tem alguma tendência. Utiliza-se essa estatística quando espera que os grupos sendo comparados tenham algum padrão específico com as medianas (Field, 2009).

Tabela 26
Teste de Tendência: Teste Jonckheere-Terpstra (Teste Estatístico J)

	Resistência
Número de Níveis de Concentração	3
N	15
Estatística J-T Observada	17,00
Estatística J-T Média	37,50
Desvio Padrão de J-T	9,45
Estatística J-T Padronizada	-2,16
Sig. Assint. (Bilateral)	0,03

Na tabela 26 mostra o número de grupos sendo comparados, que são 3. Apresenta também o valor da estatística J, que é 17,00. Informa também a média e o desvio padrão com os valores de 37,50 e 9,45, respectivamente. Sabendo desses valores é possível converter a estatística teste para o escore-z, que nesse caso vale: $z = \frac{(17,00-37,50)}{9,45} \rightarrow z = -2,16$ (Field, 2009). Esse valor de 2,16 é significativo. Além disso, o valor-z informa a ordem das medianas. Se for positivo, as medianas estão em uma ordem crescente, porém se for negativo, como é o caso desse teste, as medianas estão em ordem decrescente. Neste caso, à medida que se aumenta a concentração de fosfogesso, a resistência à compressão (com mufla) diminui (Field, 2009).

Após os resultados para o teste de tendência, são calculados os tamanhos de efeitos. Segundo Field (2009) explica que é importante relatar o tamanho do efeito de forma que as pessoas tenham uma medida padronizada do valor que foi observado. A equação que converte um escore-z em uma estimativa do tamanho de efeito é representado pela seguinte equação:

$$r = \frac{Z}{\sqrt{N}}$$

Onde z é o escore-z e N é o tamanho dos valores do estudo (total de observações realizadas) na qual z foi baseado.

Field (2009) sugere que seja calculado o tamanho de efeito para os testes de Mann-Whitney que foi utilizado para acompanhar a análise principal. Para as comparações têm-se os seguintes valores do tamanho de efeito:

$$r_{0\% \text{ vs. } 4\%} = \frac{-0,94}{\sqrt{15}}$$

$$r_{0\% \text{ vs. } 4\%} = -0,24$$

$$r_{0\% \text{ vs. } 7\%} = \frac{-2,61}{\sqrt{15}}$$

$$r_{0\% \text{ vs. } 7\%} = -0,67$$

Para a primeira comparação ($r_{0\% \text{ vs. } 4\%}$) representa um efeito pequeno, o que informa que o efeito da resistência à compressão (com mufla) para uma concentração de 4% de fosfogesso é desprezível. Já para a segunda comparação ($r_{0\% \text{ vs. } 7\%}$) representa um efeito grande. Esses valores representam uma descoberta significativa (Field, 2009).

Pode-se calcular também o tamanho de efeito para o teste de Jonckheere-Terpstra. Para isso pode-se também utilizar a mesma equação (Field, 2009):

$$\eta_{\text{Jonckheere}} = \frac{-2,16}{\sqrt{15}}$$

$$\eta_{\text{Jonckheere}} = -0,56$$

Diante dos resultados dessa terceira análise a resistência à compressão (com mufla) foi significativamente afetada pela concentração de fosfogesso ($H(2) = 9,79$, $p < 0,05$). Testes de Mann-Whitney foram utilizados para acompanhamento desse achado. Uma correção de Bonferroni foi aplicada e todos os efeitos foram testados no nível de 0,025. Percebe-se que a resistência à compressão (com mufla) não apresentou diferenças com concentração de 4% de fosfogesso ($U = 8,00$, $r = -0,24$) quando comparado com concentração de 0% de fosfogesso.

Contudo quando as concentrações de 7% de fosfogesso foram observadas, a resistência à compressão (com forno) foi significativamente menor quando comparada com concentrações de 0% de fosfogesso ($U = 0,00$, $r = -0,67$). Com isso conclui-se que concentrações de 0% e 4% de fosfogesso não apresentam diferenças significativas, ou seja, as resistências à compressão (com mufla) têm valores semelhantes. Agora quando comparado com concentrações de 7% de fosfogesso os valores são significativamente menores.

Já o teste de Jonckheere-Terpstra revelou uma tendência significativa nos dados de que quanto maior é a concentração, a resistência à compressão (com mufla) dos corpos de prova decresce, $J = 17,00$, $z = -2,16$, $r = -0,56$.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (SEM MUFLA) X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (COM MUFLA)

No caso dessa quarta análise, é utilizado delineamentos de medidas repetidas (Teste t Dependente). Diante disso, quer-se analisar se diferenças entre médias dos grupos são estatisticamente significativas. Segue os dados que serão utilizados nessa análise:

Tabela 27

Estrutura para Análise dos Dados

Compressão sem mufla (MPa) x Compressão com mufla (MPa)

Espécime	Sem mufla	Com mufla
A1	4,30	11,90
A2	3,20	11,50
A3	4,30	13,80
A4	3,80	15,40
A5	2,60	12,00
B1	3,00	13,30
B2	3,00	13,30
B3	3,20	17,30
B4	2,80	12,30
B5	2,60	12,40
C1	2,80	6,10
C2	2,60	4,60
C3	2,30	3,90
C4	2,50	4,30
C5	2,10	5,40

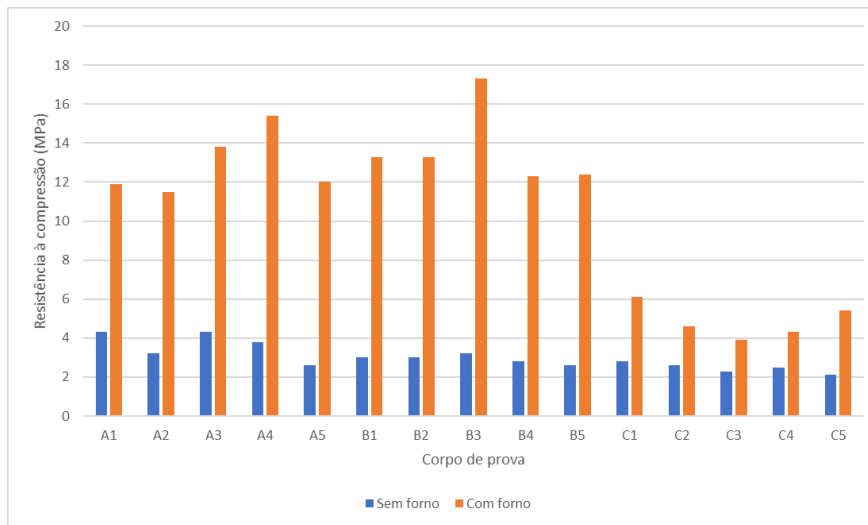


Figura 29. Compressão sem mufla x Compressão com mufla.

De acordo com a figura 29 é possível perceber um aumento considerável da resistência com a utilização da mufla. É possível identificar também resultados parecidos entre as concentrações com 0% de fosfogesso e 4% de fosfogesso.

Tabela 28
Estatísticas Amostrais Pareadas

		Média (MPa)	N	Desvio Padrão	Erro Padrão da Média
Par 1	Compressão sem mufla	3,64	5	0,73	0,32
	Compressão com mufla	12,92	5	1,64	0,73
Par 2	Compressão sem mufla	2,92	5	0,22	0,10
	Compressão com mufla	13,72	5	2,05	0,92
Par 3	Compressão sem mufla	2,46	5	0,27	0,12
	Compressão com mufla	4,86	5	0,88	0,39

A tabela 28 mostra as estatísticas resumo para as duas condições experimentais. Para cada condição são apresentados a média, o número de participantes e o desvio padrão da amostra. É importante descrever as seguintes informações:

- Par 1: Dados com concentrações de 0% de fosfogesso;
- Par 2: Dados com concentrações de 4% de fosfogesso;
- Par 3: Dados com concentrações de 7% de fosfogesso

Tabela 29
Correlações Amostrais Pareadas

	N	Correlação	Sig.
Par 1 Compressão sem mufla e Compressão com mufla	5	0.38	0.51
Par 2 Compressão sem mufla e Compressão com mufla	5	0.81	0.09
Par 3 Compressão sem mufla e Compressão com mufla	5	0.33	0.58

A tabela 29 mostra a correlação de Pearson entre as duas condições. Segundo Field (2009) quando se usa medidas repetidas, é possível que as condições experimentais se correlacionem, pois os dados em cada condição vem das mesmas pessoas, no caso dessa pesquisa, dos mesmos corpos de prova, assim pode haver consistência nas respostas. O software SPSS produz o valor do r de Pearson e a significância bilateral. Para esses dados as condições experimentais produzem coeficientes de correlação com valores de 0,38 (Par 1), 0,81 (Par 2) e 0,33 (Par 3), porém não estão correlacionas de forma significativa porque $p > 0,05$.

Tabela 30
Testes Amostrais Pareadas

	Diferenças Pareadas						t	gl	Sig. bilateral
	Média (MPa)	Desvio Padrão	Erro Padrão da Média	Intervalo de Confiança de 95% das diferenças (MPa)					
				Inferior	Superior				
Par 1 Compressão sem mufla - Compressão com mufla	-9.28	1.51	0.67	-11.16	-7.39	-13.66	4	0.000	
Par 2 Compressão sem mufla - Compressão com mufla	-10.80	1.87	0.83	-13.12	-8.47	-12.87	4	0.000	
Par 3 Compressão sem mufla - Compressão com mufla	-2.40	0.83	0.37	-3.43	-1.36	-6.43	4	0.003	

A tabela 30 mostra se a diferença entre as médias das duas condições foi grande o suficiente para não ser um resultado ao acaso (Field, 2009). A tabela fornece a diferença da média entre os escores: Pair 1 = -9,28; Pair 2 = -10,80; Pair 3 = -2,40. A tabela também apresenta o desvio padrão das diferenças e o erro padrão das diferenças entre os escores dos corpos de prova em cada condição (Field, 2009).

A estatística teste t é calculada dividindo-se a média das diferenças pelo erro padrão das diferenças. O tamanho do t é comparado contra valores conhecidos com base nos graus de liberdade. Quando os mesmos participantes foram utilizados, os graus de liberdade são o tamanho da amostra menos 1 ($df = N - 1 \rightarrow df = 5 - 1 \rightarrow df = 4$). O software SPSS usa os graus de liberdade para calcular a probabilidade exata de que um valor de t ocorra ao acaso. Essa probabilidade está na coluna denominada Sig (Significância). Por padrão o SPSS fornece a probabilidade bilateral, que é a probabilidade quando nenhuma previsão foi feita sobre a direção das diferenças entre os grupos (Field, 2009).

As probabilidades bilaterais para esses dados é muito baixa:

- Par 1: $p = 0,000$ (0%): Não há chances do valor de t possa ter ocorrido ao acaso;
- Par 2: $p = 0,000$ (0%): Não há chances do valor de t possa ter ocorrido ao acaso;
- Par 3: $p = 0,003$ (0,3%): Há somente uma chance de 0,3% do valor de t possa ter ocorrido ao acaso;

No caso dos valores de t serem negativos é porque a média das resistências à compressão sem mufla é menor que a média das resistências à compressão com mufla. Portanto, conclui-se que após os corpos de prova passar pela mufla, apresentam resistência à compressão maiores.

Esses resultados são previstos pelo diagrama de caixas apresentados na figura 30:

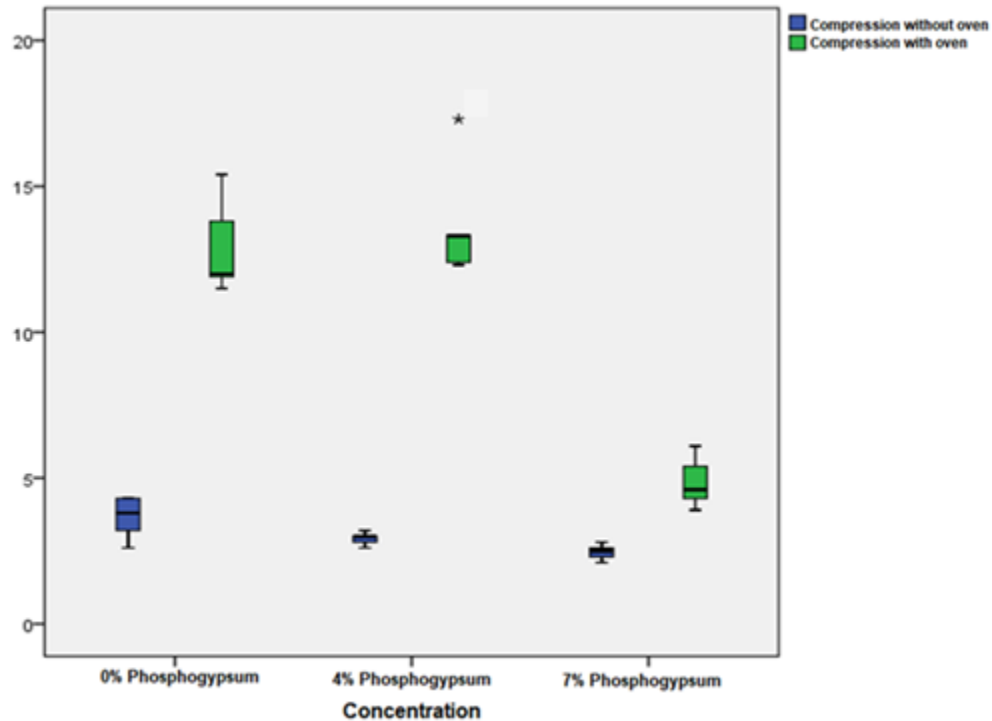


Figura 30. Diagrama de Caixas

A última informação da tabela 30 é sobre os intervalos de confiança de 95% para a diferença média. A importância do intervalo de confiança de 95% é que eles não contêm zero (ambos os limites são negativos). Isso representa que o verdadeiro valor da diferença média dificilmente será zero. Portanto, pode-se ficar confiante de que os dados não representam amostras aleatórias da mesma população (Field, 2009).

Embora o t estatístico seja estatisticamente significativo, isso não quer dizer que esse efeito seja importante em termos práticos. Para calcular é usado o tamanho de efeito r , e para converter um valor t em um valor r , utiliza-se a seguinte equação:

$$r = \sqrt{\frac{t^2}{t^2 + gl}}$$

Assim, são apresentados os seguintes efeitos:

$$Par\ 1\ (r) = \sqrt{\frac{(-13,66)^2}{(-13,66)^2 + 4}}$$

$$Par\ 1\ (r) = \sqrt{\frac{186,65}{186,65 + 4}}$$

$$Par\ 1\ (r) = \sqrt{\frac{186,65}{190,65}}$$

$$Par\ 1\ (r) = \sqrt{0,979}$$

$$Par\ 1\ (r) = 0,99$$

$$Par\ 2\ (r) = \sqrt{\frac{(-12,87)^2}{(-12,87)^2 + 4}}$$

$$Par\ 2\ (r) = \sqrt{\frac{165,69}{165,69 + 4}}$$

$$Par\ 2\ (r) = \sqrt{\frac{165,69}{169,69}}$$

$$Par\ 2\ (r) = \sqrt{0,976}$$

$$Par\ 2\ (r) = 0,99$$

$$Par\ 3\ (r) = \sqrt{\frac{(-6,43)^2}{(-6,43)^2 + 4}}$$

$$Par\ 3\ (r) = \sqrt{\frac{41,43}{41,43 + 4}}$$

$$Par\ 3\ (r) = \sqrt{\frac{41,43}{45,43}}$$

$$Par\ 3\ (r) = \sqrt{0,912}$$

$$Par\ 3\ (r) = 0,95$$

Esses valores de tamanho de efeito representam um efeito muito grande (está acima de 0,5). Portanto, além de estatisticamente significativo, esse efeito também é grande, desse modo, representa uma descoberta significativa (Field, 2009).

Diante dos resultados dessa quarta análise, conclui-se que:

- Na média, os corpos de prova com nenhuma concentração de fosfogesso apresentam maiores resistências quando levados à mufla ($M = 12,92$, $EP = 0,73$) do que com os corpos de prova com nenhuma concentração de fosfogesso sem a utilização da mufla ($M = 3,64$, $EP = 0,32$, $t(4) = -13,66$, $p < 0,05$, $r = 0,99$).
- Na média, os corpos de prova com concentração de 4% de fosfogesso apresentam maiores resistências quando levados à mufla ($M = 13,72$, $EP = 0,92$) do que com corpos de prova com concentração de 4% de fosfogesso sem a utilização da mufla ($M = 2,92$, $EP = 0,10$, $t(4) = -12,87$, $p < 0,05$, $r = 0,99$).
- Na média, os corpos de prova com concentração de 7% de fosfogesso apresentam maiores resistências quando levados à mufla ($M = 4,86$, $EP = 0,39$) do que com corpos de prova com concentração de 7% de fosfogesso sem a utilização da mufla ($M = 2,46$, $EP = 0,12$, $t(4) = -6,43$, $p < 0,05$, $r = 0,95$).

5. CONCLUSÃO

Do que diz respeito à disposição e tratamento dos resíduos sólidos nas cidades, de 2010 a 2019 a geração de resíduos sólidos aumentou consideravelmente, e na mesma direção as unidades inadequadas cresceram também. No caso do fosfogesso, que é o foco desse trabalho, a sua reutilização ainda não se equivale a sua produção, ou seja, as indústrias de fertilizantes fosfatados enviam o resíduo para ser utilizado em uma escala pouco considerável.

Ao levar em consideração a questão ambiental, no Brasil, por meio da Lei n. 12.305 de 2010, que instituiu a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, foi um grande avanço na busca pela normatização, todavia esse avanço foi insuficiente porque muitos desafios não foram solucionados, como por exemplo, a falta de planejamento estratégico de inserir o fosfogesso numa cadeia produtiva consolidada.

Diante disso, este trabalho buscou verificar a possibilidade de uma dosagem mais adequada para a incorporação desse resíduo no setor da construção civil, tornando-o um material alternativo, com o intuito de minimizar a sua problemática.

Entender e conhecer o fosfogesso é importante para a compreensão das propriedades físicas, morfológicas, mineralógicas e mecânicas. Dessa forma a etapa de caracterização desse resíduo foi fundamental para uma análise conclusiva. Os resultados obtidos nesse estudo validam o fosfogesso, a partir de metodologias adotadas, a possibilidade de sua utilização como material alternativo no setor da construção civil.

Um dos motivos de se utilizar esse resíduo industrial é que não apresenta riscos de contaminação do solo, até porque a principal problemática está relacionada com a quantidade gerada. Segundo Canut (2006), as impurezas presentes no fosfogesso, por serem de baixos teores, provavelmente não irão interferir na qualidade do produto final à base de fosfogesso.

A utilização de materiais alternativos, como misturas de fosfogesso e solo, pode ser considerada uma solução para minimizar a quantidade de fosfogesso estocada próximas às indústrias. Diante disso o solo utilizado nos ensaios de caracterização foi classificado como uma argila gorda de alta ou média plasticidade. Já no caso do fosfogesso, analisando as curvas granulométricas, pode ser incluído na classe dos siltes, com mais de 75% de suas partículas passantes na peneira n. 200.

Com os resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão simples e tração na flexão realizados nesta pesquisa tem-se que:

- Para os ensaios de tração na flexão, as resistências apresentaram uma tendência de queda à medida que se aumentava a concentração de fosfogesso nas misturas, porém ao analisar esses dados estatisticamente é possível perceber que os corpos de prova com misturas de solo com 4% de fosfogesso apresentaram médias parecidas com os corpos de prova sem adição de fosfogesso.

Para os ensaios de compressão simples foram analisados os corpos de prova sem a utilização da mufla e com a utilização da mufla. Para os corpos de prova sem mufla e com mufla, tem-se:

- A partir dos dados analisados, é possível perceber a mesma tendência apresentada nos ensaios de tração na flexão, e ao analisar de forma estatística os corpos de prova com misturas de solo com 4% de fosfogesso, percebe-se que não apresentam diferenças significativas quando comparados com os corpos de prova sem adição de fosfogesso. Para os corpos de prova que utilizaram a mufla, as conclusões são as mesmas dos corpos de prova sem a mufla.

Com esses resultados a dosagem de solo com 4% de fosfogesso se equipara com os corpos de prova sem adição de fosfogesso. Uma outra informação importante é que, por mais que as misturas de solo com 4% de fosfogesso equivalem estatisticamente com as misturas sem adição de fosfogesso, as misturas de solo com 7% de fosfogesso também podem ser utilizadas.

Um exemplo da sua utilização é que ao levar em consideração as médias das resistências à compressão simples (com mufla), a norma ABNT NBR 15270-1/2017 apresenta os requisitos para a fabricação de blocos e tijolos cerâmicos para alvenaria. De acordo com a norma, a mistura com concentração de 4% de fosfogesso pode ser utilizada para tijolos maciços para vedação da classe 40. Além disso, essa mistura também podem ser utilizadas para tijolos maciços estruturais das classes 60, 80, 100 e 120. No caso das misturas com concentração de 7% de fosfogesso pode ser usada para tijolos maciços para vedação da classe 40.

A partir desse exemplo, a possibilidade de reduzir as pilhas de fosfogesso incorporando na fabricação de tijolos se torna viável à medida que também irá reduzir a quantidade de matéria prima extraída das jazidas de uso cerâmico.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10.004, de 30 de novembro de 2004. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 10.005, de 30 de novembro de 2004. Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 10.006, de 30 de novembro de 2004. Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 13.279, de 31 de outubro de 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes de tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15.270-1, de 29 de novembro de 2017. Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15.270-2, de 29 de novembro de 2017. Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 6.457, de 8 de março de 2017. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 6.459, de 7 de abril de 2017. Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 7.180, de 30 de março de 2016. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 7.181, de 29 de setembro de 2018. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 7.182, de 29 de setembro de 2016. Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Alves, K. C. S. K. (2015). *Estudo do fosfogesso tratado termicamente e de suas misturas com solo tropical* (Dissertação de Pós-Graduação). Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, GO, Brasil.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2017). *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2017*. São Paulo.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2018/2019). *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019*. São Paulo.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020). *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2020*. São Paulo.

- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2009). *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2009*. São Paulo.
- Associação Nacional de Cerâmica (2019). *Dados do setor*. Rio de Janeiro: Autor. Recuperado de: anicer.com.br/anicer/setor/
- Batalha, M. S. (2011). *Transporte multicomponente dos contaminantes liberados no ambiente pela aplicação do fosfogesso* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Besen, G. R. (2011). *Coleta Seletiva com inclusão de catadores: construção participativa de indicadores e índices de sustentabilidade* (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil.
- Bustamante, G. M., & Bressiani, J. C. (2000). A indústria cerâmica brasileira. *Cerâmica Industrial*, 5(3).
- Cánovas, C. R., Macías, F., Péres-Lopez, R., Basallote, M. D., & Millan-Becerro, R. (2018). Valorization of wastes from the fertilizer industry: Current status and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 174, 678-690.
- Canut, M. M. C. (2006). *Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção* (Dissertação de Pós-Graduação). Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Cipriano, P. B., Rezende, R. T. O., & Ferraza, A. V. (2019). Produção de cerâmica vermelha utilizando argila da mineração de gipsita e resíduo de gesso. *Acta Brasiliensis*, 3(1), 25-29.
- Costa, L. J. P. (2011). *Estudo de exalação de radônio em placas e tijolos de fosfogesso de diferentes procedências* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2006). *Manual de pavimentação*. Rio de Janeiro.
- Fernandes, G. (2017). Utilização de sulfato de cálcio na fabricação de tijolos. *FAZU em Revista*, 11, 18-23.
- Fundação de Apoio ao Desenvolvimento (2012). *Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão: Relatório final do perfil institucional, quadro legal e políticas públicas relacionados a resíduos sólidos urbanos no Brasil e no Exterior*. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Pernambuco.
- Gonçalves, C. P., & Cardoso, A. F. (2016, maio). A utilização da cerâmica nas técnicas construtivas em busca da inovação e sustentabilidade. *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Águas de Lindóia, SP, Brasil, 60.

- Hair Jr., J. F., Babin, B., Money, A. H., & Samouel, P. (2005). Fundamentos de métodos de pesquisa em administração. Porto Alegre: Bookman.
- Hull, C. D., & Burnett, W. C. (1996). Radiochemistry of Florida phosphogypsum. *Journal of Environmental Radioactivity*, 32(3), 213-238.
- Ishida, H. K., Valente, A. C. F., Villegas, T. A., & Pinzón, F. M. (2018). *Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados* (Pesquisa/Produto/Trabalho executado com recursos provenientes do acordo de empréstimo n. 8.095 – BR). Brasil.
- Jacobi, P. R., & Besen, G. R. (2011). Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados*, 25(71), 135-158.
- Junior, M. C., Azevedo, P. B. M., Cuchierato, G., & Motta, J. F. M. (2019). Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: Parte 1 – Introdução e a indústria de cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, 24(1).
- Junior, O. B. S. (2002). Fosfogesso estabilizado com cimento para aplicação na construção rodoviária – A influência do tipo de cimento na resistência e deformabilidade da mistura (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP, Brasil.
- Kozievitch, V. F. J., Valenzuela-Diaz, F. R., Dias, J. F., & Toffoli, S. M. (2000). Caracterização de argilas utilizadas para fabricação de cerâmica estrutural na região de Monte Carmelo, MG. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, São Pedro, SP, Brasil, 14.
- Lei n. 12.305, de 2 de Agosto de 2010 (2010). Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Recuperado de: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm
- Magalhães, C. F. B. (2016). Análise do processo produtivo dos tijolos cerâmicos na fábrica Nova São José de Itacoatiara/AM: um estudo de caso (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, PA, Brasil.
- Martins, G. A., & Theóphilo, C. R. (2009). Metodologia da investigação científica para ciências sociais aplicadas. São Paulo: Atlas.
- Matos, T. H. C. (2011). *Caracterização hidro-mecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Brasília – UnB, Brasília, Brasil.
- Matuti, B. B. (2019). *Reutilização de resíduos da construção civil e demolição na fabricação de tijolo cerâmico* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Amazonas – UFA, Manaus, AM, Brasil.
- Mazzilli, B. P. et al. (2020). Radiological implications of using phosphogypsum as building material: a case study of Brazil. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 1-29.
- Melo, R. A. A., & Silva, D. G. (2013). Estudo da viabilidade do uso do fosfogesso como matéria-prima na produção de materiais cerâmicos. *E-xacta*, 6(2), 13-31.

- Menéndez, D. D., & Cañete, O. R. (2010). The Spanish Waste Sector: Waste Collection, Transport and Treatment. *Working paper CIRIEC No. 2010/03*. Universidad Autónoma de Madrid (UAM), Spain.
- Mesquita, G. M. (2007). *Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, GO, Brasil.
- Mucheti, A. S. (2008). *Estacas hélice segmentada: execução, verificação de integridade e o estudo do comportamento* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil.
- Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1995). *Pavimentacao de baixo custo com solos lateriticos*. São Paulo: Vilibor.
- Oliva, J. A. O. (1997). *Estudo de misturas de solo e fosfogesso com vistas a sua utilização em rodovias* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP, Brasil.
- Oliveira, J. I. (2014). *Estudo do resíduo fosfogesso na formulação de uma pasta para revestimento interno de edifícios* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, RN, Brasil.
- Oliveira, S. M. F. (2005). *Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP, Brasil.
- Parente, E. B. (2002). *Avaliação do comportamento mecânico das misturas de solo-cimento e fosfogesso e cimento para uso na construção rodoviária* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP, Brasil.
- Pinto, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos* (3a ed.). São Paulo: Oficina de textos.
- Rabi, J. A., & Silva, N. C. (2005). Radon exalation from phosphogypsum building boards: summetry constraints, impermeable boundary condition and numerical of a test case. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1-12.
- Rufo, R. C. (2009). *Estudo laboratorial de misturas de fosfogesso, solo tropical e cal para fins de pavimentação* (Dissertação de Pós-Graduação). Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, GO, Brasil.
- Sales, J. C. et al. (2016, maio). As argilas para fabricar cerâmica vermelha no Nordeste Brasileiro. *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Águas de Lindóia, SP, Brasil, 60.
- Sampaio, F., & Werlang, M. K. (2016). Análise dos resíduos sólidos industriais perigosos no município de Panambi, RS. *Ciência e Natura*, 38(1), 1285-1293.
- Santos, L. O. (2017). *Geração de resíduos industriais e controle ambiental: estudo de caso* (Monografia). Universidade do Vale do Taquari – UNITAVES, Lajeado, RS, Brasil.

- Santos, T. L. (2016). *Estudo do comportamento mecânico do fosfogesso hemi-hidratado* (Dissertação de Pós-Graduação). Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, GO, Brasil.
- Saueia, C.H. R. (1998). Caracterização radioquímica do fosfogesso e implicações radiológicas de sua utilização como material de construção (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil.
- Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (2008). *Cerâmica vermelha: Estudos de mercado Sebrae/ESPM: Cerâmica vermelha para a construção: Telhas, tijolos e tubos*. São Paulo: Autor. Recuperado de: <http://www.sebraemercados.com.br/wp-content/uploads/2015/09/ESTUDO-CERAMICA-VERMELHA.pdf>
- Silva, O. H. et al. (2015). Etapas do gerenciamento de resíduos da construção civil. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 19, 39-48. doi: 105902/22361170 20558
- Silveira, L. R., & Borges, R. A. (2015). Uso de materiais alternativos para melhoria do solo na pavimentação de vias. *Engineering and Science*, 1. doi: 10.18607/ES20165052
- Takeda, M. C. (1998). Avaliação das propriedades mecânicas de mistura de fosfogesso e cimento para uso na construção rodoviária (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP, Brasil.
- Villaverde, F. L. (2008). *Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil.