

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO COELHO ROBERTO

**ENSAIOS DE ABATIMENTO E COMPRESSÃO AXIAL DE CONCRETO COM
FOSFOGESSO COMO AGREGADO MIÚDO**

SANTOS/SP

2017

RODRIGO COELHO ROBERTO

**ENSAIOS DE ABATIMENTO E COMPRESSÃO AXIAL DE CONCRETO COM
FOSFOGESSO COMO AGREGADO MIÚDO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação da Prof^a. Dra. Marlene Silva de Moraes e coorientador Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

SANTOS/SP

2017

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Coelho Roberto, Rodrigo.

Ensaio de Abatimento e compressão axial de concreto com fosfogesso como agregado miúdo. Rodrigo Coelho Roberto. - 2017
101 p.

Orientador: Profa. Dra. Marlene Silva de Moraes
Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos,
SP, 2017.

1. Fosfogesso. 2. Concreto. 3. Materiais de Construção
4. Consistência. 5. Resistência.
I. Moraes, Marlene. II. Moraes, Deovaldo. III. Ensaio de Abatimento e
compressão axial de concreto com fosfogesso como agregado miúdo.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Carlos e Regina, à minha esposa, Talita, pelo incentivo e apoio constante e à minha filha, Maitê Dandara, por ser minha motivação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos orientadores, Dra. Marlene Silva de Moraes e Dr. Deovaldo de Moraes Júnior, por mostrarem os caminhos, pela amizade e ensinamentos.

Ao grande amigo, Denis Queiroz de Lucena, que me influenciou de forma decisiva a iniciar, continuar e terminar o mestrado.

Ao professor e amigo, Márcio Tavares, pela ajuda e por ensinar que a humildade é o caminho.

Ao Dr. Aldo Ramos Santo pelas relevantes contribuições para o aperfeiçoamento do texto.

À Universidade Santa Cecília, pela oportunidade.

À UNAERP, por disponibilizar o Laboratório de Materiais de Construção Civil, onde realizei os ensaios.

Aos estagiários do laboratório, Tiago Xavier e Jennifer Daniel, por auxiliarem na execução dos experimentos.

Às secretárias da pós-graduação, Sandra e Imaculada, pela atenção, simpatia e cortesia.

À COPEBRÁS pelo fornecimento do material fosfogesso.

EPÍGRAFE

"Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma"

Lavoisier, Antoine Laurent (1743-1794)

Lei da conservação da matéria

RESUMO

No Brasil, até o presente momento, o fosfogesso é considerado como um passivo ambiental, sendo normalmente gerado e armazenado na própria planta das indústrias de fertilizantes. A produção brasileira deste resíduo chega a mais de 4,5 milhões de toneladas por ano. Este trabalho teve como objetivo verificar a análise experimental do fosfogesso como agregado miúdo na composição do traço de concreto utilizado na construção civil. Foram estudados quatro traços: a) convencional; b) com 90% de areia média e 10% de fosfogesso; c) 80% de areia média e 20% de fosfogesso e d) 70% de areia média e 30% de fosfogesso. Os ensaios de abatimento (*slump test*) indicaram que não houve uma variação significativa no que concerne à coesão e trabalhabilidade. As tensões médias de ruptura em Mpa foram de 13,6 para o traço (a) convencional, 11,01 para o (b), 8,08 quando se empregou a correção (c) e 7,16 com 70% de areia média e 30% de fosfogesso demonstrando a limitação do emprego do fosfogesso como agregado miúdo em elementos estruturais.

Palavras-chave: Fosfogesso. Concreto. *Slump test*. Resistência do concreto.

ABSTRACT

In Brazil, until this moment, phosphogypsum is concerned as an environmental liability, and it is usually generated and stored itself in the plan of the fertilizer industries. The Brazilian production of this residue reaches more than 4.5 million tonnes per annum. This work aims to verify the experimental analysis of phosphogypsum as fine aggregated to the composition of the concrete line used in civil construction. Four lines were studied: a) conventional; b) with 90% average sand and 10% phosphogypsum; c) 80% average sand and 20% phosphogypsum and d) 70% average sand and 30% of phosphogypsum. The reduction tests (slump test) indicated that there was no significant variation in relation to cohesion and workability. The average rupture tensions in Mpa were from 13.6 to the conventional line (a), 11.01 for the (b), 8.08 when employed the correction (c) and 7.16 with 70% of average sand and 30% phosphogypsum demonstrating the limitation of use of phosphogypsum as fine aggregate structural elements.

Keywords: Phosphogypsum. Concrete. Slump test. Concrete resistance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ATERRO DO RESÍDUO FOSFOGESSO A CÉU ABERTO.	20
FIGURA 2: FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROCESSO INDUSTRIAL PARA A OBTENÇÃO DO ÁCIDO FOSFÓRICO E PONTO DE GERAÇÃO DO FOSFOGESSO.....	22
FIGURA 3: PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ÁCIDO FOSFÓRICO E GERAÇÃO DO RESÍDUO FOSFOGESSO.	23
FIGURA 4: FLUXOGRAMA DA SÉRIE DE DECAIMENTO DO ^{232}Th	28
FIGURA 5: FLUXOGRAMA DA SÉRIE DE DECAIMENTO DO ^{238}U	29
FIGURA 6: ADENSAMENTO DO CONCRETO COM VIBRADORES DE IMERSÃO.	34
FIGURA 7: DIMENSÕES DO MOLDE.	43
FIGURA 8: COMPLEMENTO TRONCO-CÔNICO METÁLICO DE ENCHIMENTO, ADAPTÁVEL À BASE SUPERIOR DO MOLDE.....	43
FIGURA 9: MEDIDA DO ABATIMENTO.	44
FIGURA 10: FORMAS DE ABATIMENTO: CORRETO (A); CISALHAMENTO (B) E DESAGREGAÇÃO (C).....	45
FIGURA 11: AGITADOR MECÂNICO.	50
FIGURA 12: BALANÇA DE PRECISÃO.....	51
FIGURA 13: ESTUFA.	51
FIGURA 14: AMOSTRA DE FOSFOGESSO E AREIA.	53
FIGURA 15: ESTUFA COM AMOSTRAS DE FOSFOGESSO E AREIA.....	53
FIGURA 16: MASSA SECA DA ÁREA MÉDIA MAIS TARA DA BALANÇA.	54
FIGURA 17: MASSA SECA DO FOSFOGESSO MAIS TARA DA BALANÇA.	54
FIGURA 18: EQUIPAMENTOS DO <i>SLUMP TEST</i>	60
FIGURA 19: FOSFOGESSO.....	61
FIGURA 20: CIMENTO PORTLAND.....	61
FIGURA 21: AGREGADO MIÚDO.	62
FIGURA 22: AGREGADO GRAÚDO.	62
FIGURA 23: ÁGUA UTILIZADA NO CONCRETO.....	63
FIGURA 24: MISTURA DOS MATERIAIS PARA TRAÇO 1.....	64
FIGURA 25: <i>SLUMP TEST</i> TRAÇO 1.....	64
FIGURA 26: TRAÇO 2 (90% AREIA E 10% FOSFOGESSO).....	65
FIGURA 27: MISTURA DOS MATERIAIS PARA TRAÇO 2.....	65
FIGURA 28: <i>SLUMP TEST</i> TRAÇO 2.....	66
FIGURA 29: TRAÇO 3 (80% AREIA E 20% FOSFOGESSO).....	66
FIGURA 30: MISTURA DOS MATERIAIS PARA TRAÇO 3.....	67
FIGURA 31: <i>SLUMP TEST</i> TRAÇO 3.....	67
FIGURA 32: TRAÇO 4 (70% AREIA E 30% FOSFOGESSO).....	68
FIGURA 33: MISTURA DOS MATERIAIS PARA TRAÇO 4.....	68
FIGURA 34: <i>SLUMP TEST</i> TRAÇO 4.....	69
FIGURA 35: CORPO DE PROVA 7 DIAS – TRAÇO 1.....	70

FIGURA 36: ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA 7 DIAS.	70
FIGURA 37: CORPO DE PROVA ROMPIDO 7 DIAS – TRAÇO 1.....	71
FIGURA 38: ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA 7DIAS – TRAÇO 2.	71
FIGURA 39: CORPO DE PROVA ROMPIDO 7 DIAS – TRAÇO 2.....	72
FIGURA 40: CORPO DE PROVA 7 DIAS – TRAÇO 2.....	72
FIGURA 41: ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA 28 DIAS – TRAÇO 2.	72
FIGURA 42: CORPO DE PROVA ROMPIDO 28 DIAS – TRAÇO 2.....	73
FIGURA 43: ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA 7 DIAS – TRAÇO 3.	73
FIGURA 44: CORPO DE PROVA 7 DIAS - TRAÇO 3.....	74
FIGURA 45: CORPO DE PROVA ROMPIDO 7 DIAS – TRAÇO 3.....	74
FIGURA 46: CORPO DE PROVA 28 DIAS - TRAÇO 3.....	75
FIGURA 47: CORPO DE PROVA ROMPIDO 28 DIAS – TRAÇO 3.....	75
FIGURA 48: ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA 7 DIAS – TRAÇO 4.	76
FIGURA 49: CORPO DE PROVA ROMPIDO 7 DIAS – TRAÇO 4.....	76
FIGURA 50 CORPO DE PROVA 7 DIAS - TRAÇO 4.....	77
FIGURA 51: ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA 28 DIAS – TRAÇO 4.	77
FIGURA 52: CORPO DE PROVA ROMPIDO 28 DIAS – TRAÇO 4.....	78
FIGURA 53: SOLUÇÃO BUFFER.	79
FIGURA 54: MEDIDOR DIGITAL DE PH.	79
FIGURA 55: TRAÇO 1 COM FENOLFTALEÍNA.	80
FIGURA 56: TRAÇO 2 COM FENOLFTALEÍNA.	80
FIGURA 57: TRAÇO 3 COM FENOLFTALEÍNA.	81
FIGURA 58: TRAÇO 4 COM FENOLFTALEÍNA.	81
FIGURA 59: CURVA GRANULOMÉTRICA.....	82
FIGURA 60: RUPTURA TRAÇO 1.....	85
FIGURA 61: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 1 - TRAÇO 1.	86
FIGURA 62: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 2 - TRAÇO 1.	86
FIGURA 63: RUPTURA TRAÇO 2.....	87
FIGURA 64: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA - 5 TRAÇO 2.	87
FIGURA 65: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 6 - TRAÇO 2.	88
FIGURA 66: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 7 - TRAÇO 2.	88
FIGURA 67: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 8 - TRAÇO 2.	89
FIGURA 68: RUPTURA TRAÇO 3.....	89
FIGURA 69: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 9 - TRAÇO 3.	90
FIGURA 70: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 10 - TRAÇO 3.	90

FIGURA 71: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 11 - TRAÇO 3.	90
FIGURA 72: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 12 - TRAÇO 3.	91
FIGURA 73: RUPTURA TRAÇO 4.	91
FIGURA 74: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 13 - TRAÇO 4.	92
FIGURA 75: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 14 - TRAÇO 4.	92
FIGURA 76: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 15 - TRAÇO 4.	92
FIGURA 77: CARGA NO MOMENTO DA RUPTURA DO CORPO DE PROVA 16 - TRAÇO 4.	93
FIGURA 78: RUPTURA PREVISTA X REALIZADA COMPARATIVO	94
FIGURA 79: TRAÇO 1 VALOR DO PH.	95
FIGURA 80: TRAÇO 2 VALOR DO PH.	95
FIGURA 81: TRAÇO 3 VALOR DO PH.	96
FIGURA 82: TRAÇO 4 VALOR DO PH.	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PROCESSO DE ADENSAMENTO	34
TABELA 2: RELAÇÃO ENTRE TRABALHABILIDADE E GRANDEZA DE ABATIMENTO.....	42
TABELA 3: CLASSIFICAÇÃO DAS CONSISTÊNCIAS DO CONCRETO	46
TABELA 4: CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	55
TABELA 5: TRAÇO DE CONCRETO PARA AMOSTRA 1.....	55
TABELA 6: TRAÇO DE CONCRETO PARA AMOSTRA 2.....	56
TABELA 7: TRAÇO DE CONCRETO PARA AMOSTRA 3.....	56
TABELA 8: TRAÇO DE CONCRETO PARA AMOSTRA 4.....	56
TABELA 9: MASSA DOS ELEMENTOS	57
TABELA 10: TRANSFORMAÇÃO DO TRAÇO EM QUILOGRAMAS PARA LITROS	57
TABELA 11: VOLUME TOTAL TRONCO CONE	58
TABELA 12: VOLUME TOTAL CILINDRO	58
TABELA 13: TRANSFORMAÇÃO DO TRAÇO DE LITROS PARA QUILOGRAMA .	59
TABELA 14: DISTRIBUIÇÃO DO FOSFOGESSO RETIDO NAS MALHAS DAS PENEIRAS.....	82
TABELA 15: RESULTADOS DO ENSAIO DE DENSIDADE	83
TABELA 16: RESULTADOS DO ENSAIO DE CONSISTÊNCIA " <i>SLUMP TEST</i> "	84
TABELA 17: RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL TRAÇO 1	85
TABELA 18: RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL TRAÇO 2	87
TABELA 19: RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL TRAÇO 3.	89
TABELA 20: RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL TRAÇO 4	91
TABELA 21: PROPRIEDADES APRESENTADAS PELOS CORPOS DE PROVA ..	93

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: PESQUISAS REFERENTES AO FOSFOGESSO.	24
QUADRO 2: NORMAS PARA CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SEGUNDO A ABNT	26
QUADRO 3: CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS.....	27
QUADRO 4: NOMENCLATURA DOS CIMENTOS PORTLAND.	37
QUADRO 5: TRAÇO DO CONCRETO	41
QUADRO 6: MATERIAIS UTILIZADOS PARA O CONCRETO COM A ADIÇÃO DO FOSFOGESSO.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS

USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP RS	Cimento Portland resistente a sulfato
CP	Cimento Portland
DER/SP	Departamento de estrada e rodagem de São Paulo
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
MPa	Mega Pascal (unidade de medida)
NBR	Norma Brasileira
NM	Normalização no Mercosul
L/V	Litros divididos pelo volume total
Cc	Consumo de Cimento
Ca	Consumo de água
a/c	Fator água / cimento
RCC	Resíduos construção civil
PNRS	Políticas Nacionais de Resíduos Sólidos

LISTA DE SÍMBOLOS

Bq/m ² s	Becquerel por metro quadrado segundo
Ci/m ² s	Curie por metro quadrado segundo
H ₃ PO ₄	Fórmula molecular do ácido fosfórico
g/cm ³	Grama por centímetro cubico
°C	Grau Celsius
±	Mais ou menos
≤	Menor ou igual
≥	Maior ou igual
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
P ₂ O ₅	Pentóxido de difósforo
%	Por cento
kg	Quilograma
kg/l	Quilograma por litro
²²² Rn	Radônio
⁴⁰ K	Radionuclídeo
³ / ₄	Três quartos
²³² Th	Tório
²³⁸ U	Urânio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS.....	19
1.1.1	Objetivo geral.....	19
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
2	REFERÊNCIAS	20
2.1	FOSFOGESSO.....	20
2.2	GERAÇÃO DO FOSFOGESSO	21
2.3	APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO	24
2.3.1	Aplicação na agricultura	24
2.3.2	Aplicação na produção de cimento	25
2.3.3	Aplicação na construção civil	25
2.4	DESCARTE DO FOSFOGESSO	25
2.5	CLASSIFICAÇÃO DO FOSFOGESSO	26
2.6	RADIAÇÃO DO FOSFOGESSO	27
2.7	CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	30
2.7.1	Concreto fresco	31
2.7.2	Consistência do concreto	31
2.7.3	Trabalhabilidade	32
2.7.4	Homogeneidade	32
2.7.5	Adensamento do concreto	33
2.7.6	Início do endurecimento do concreto (Pega)	34
2.7.7	Cura do concreto	35
2.7.8	Resistência característica do concreto (fck)	35
2.7.9	pH do concreto	36
2.8	CARACTERIZAÇÕES DOS AGREGADOS E MATERIAIS DO CONCRETO	
	36	
2.8.1	Cimento.....	36
2.8.2	Tipos de cimento	36
2.8.3	Água.....	38
2.8.4	Agregado	38
2.8.5	Agregado miúdo	39
2.8.6	Agregado graúdo.....	39
2.8.7	Teor de umidade dos agregados	40

2.8.7.1	Densidade aparente do agregado	40
2.9	TRAÇO DE CONCRETO	40
2.10	CONSISTÊNCIA DO CONCRETO PELO ABATIMENTO DO TRONCO CONE (<i>SLUMP TEST</i>).....	41
2.10.1.1	Classificação do Teste de Abatimento (Slump Test) do concreto ..	45
2.11	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO ATRAVÉS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL.	46
3	MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1	DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO FOSFOGESSO.....	49
3.2	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DO FOSFOGESSO	50
3.3	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	53
3.4	TRAÇO DE CONCRETO DESENVOLVIDO PARA O EXPERIMENTO	55
3.5	DETERMINAÇÃO DO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (<i>SLUMP TEST</i>).....	59
3.5.1	Coleta do Material e Preparação dos Agregados.....	60
3.5.2	Determinação do teste de abatimento (Slump Test)	63
3.5.2.1	Ensaio de Slump traço 1,2,3 e 4.	63
3.6	DETERMINAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO	69
3.6.1	Ensaio de compressão traço 1, 2, 3 e 4	69
3.7	DETERMINAÇÃO DO ENSAIO DE pH	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1	ENSAIO GRANULOMÉTRICO.....	82
4.2	DENSIDADE APARENTE DO FOSFOGESSO	83
4.3	TEOR DE UMIDADE DO FOSFOGESSO E AREIA MÉDIA.....	83
4.4	ENSAIO DE CONSISTÊNCIA	84
4.5	ENSAIO DE COMPRESSÃO	84
4.6	ENSAIO DE pH.....	94
5	CONCLUSÃO	97
5.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	97
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

A produção de ácido fosfórico nas indústrias de fertilizantes gera um grande volume de fosfogesso. Com isso, os órgãos públicos e ambientais e, principalmente, as prefeituras municipais, onde essas indústrias se estabelecem, vêm tendo uma preocupação cada vez maior aos impactos causados pelo mau armazenamento. A produção industrial de ácido fosfórico (H_3PO_4), por via úmida, realiza-se pela reação química entre a rocha fosfática, representada pelo fosfato tricálcico [$Ca_3(PO_4)_2$] e o ácido sulfúrico (H_2SO_4), gerando, como subproduto indesejável, o fosfogesso, representado pelo sulfato de cálcio di-hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (OLIVEIRA, 2005). A utilização desse material na construção civil poderá contribuir com a diminuição do grande volume de resíduo armazenado e, automaticamente, com a redução dos impactos causados ao meio ambiente.

O fosfogesso, segundo Oliveira (2005), é um sulfato de cálcio hidratado que tem diferentes graus de hidratação com certa variação entre anidro e desidratado. Sua produção pode ser por via úmida, seca, ou térmica, porém a maior parte da produção do ácido fosfórico é formada pela via úmida. No contexto da produção atual, seja na indústria ou na produção da matéria-prima, é possível verificar alguns fatores em comum em relação ao impacto ambiental e econômico, que é o desperdício de matéria-prima e de energia, ligado à geração de resíduos. (LEMOS, 1998 apud FERRARI, 2012). De acordo com a composição da rocha fosfática, a produção de fosfogesso pode chegar até 4,5 toneladas para cada 1 tonelada de ácido fosfórico. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (2008), a produção mundial de concentrado de rocha fosfática em 2007 foi de, aproximadamente, 145.585 milhões de toneladas, 3,6% a mais em relação a 2006. A China produziu cerca de 24% do total mundial produzido, logo após os EUA numa produção de 21% e Marrocos com 20%. Nesta escala o Brasil ficou em sexto lugar, com uma produção de 4%, aproximadamente 6.185 milhões de toneladas.

No Brasil são extraídos da natureza diversos tipos de matéria-prima e uma delas é a rocha fosfática, principal material da produção de ácido fosfórico, havendo uma reserva de milhões de toneladas espalhadas ao longo do país, como em Minas Gerais, Goiás e São Paulo. (DNPM, 2008 apud FERRARI, 2012).

Diante do grande volume de fosfogesso gerando certo impacto ambiental, despertam-se a preocupação e a necessidade da utilização do mesmo, de uma maneira econômica e socialmente viável. Em virtude dos dados mencionados, a utilização do fosfogesso dará grande contribuição à diminuição do impacto ambiental causado por esse resíduo (CANUT, 2006).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo analisar o resultado do traço de concreto realizado com a adição do fosfogesso, comparado com um traço de concreto convencional.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a. Analisar os resultados das amostras do concreto convencional e do concreto com adição do fosfogesso como agregado miúdo na sua composição, através dos ensaios de *Slump Test* (teste do abatimento do concreto) e de compressão axial (corpo de prova);
- b. Verificar a possibilidade da utilização do fosfogesso como agregado miúdo na composição do concreto para utilização de argamassas e concreto com finalidade estrutural na construção civil.

2 REFERÊNCIAS

2.1 FOSFOGESSO

O fosfogesso é um subproduto gerado nas indústrias de fertilizantes fosfatados, produzido durante o processo de criação do ácido fosfórico pela reação da rocha fosfática com o ácido sulfúrico (Figura 1). O volume de produção desse resíduo é de 4 a 6 vezes maior em relação ao do ácido fosfórico. Pelo excesso de volume, as indústrias produtoras de fertilizantes apontam o fosfogesso como um grande passivo ambiental (CANUT, 2006). A literatura técnica denomina o resíduo fosfogesso como subproduto do gesso, resíduo de gesso, gesso químico, gesso agrícola, entre outros. A composição desse resíduo contém cerca de 0,7 a 0,9% de fosfórico, por isso denomina-se fosfogesso (SANTOS, 2001 apud SILVA, 2013).



Figura 1: Aterro do resíduo fosfogesso a céu aberto.
Fonte: (Clube do Concreto, 2011).

Segundo Villaverde (2008), o fosfogesso está em destaque em relação aos outros produtos provenientes de matéria-prima. Ele é produzido numa escala superior em relação aos outros materiais oriundos de matérias-primas naturais.

Em todo o mundo, há determinadas matérias-primas, contudo, algumas regiões sofrem por não terem jazidas de gesso e, por conta dessa deficiência, existe uma escassez de material em alguns países. De acordo com essa falta de gesso, a utilização do fosfogesso cresce cada vez mais, sendo o Japão um país que serve de

exemplo, pois a aplicação do fosfogesso vem sendo cada vez maior justamente pela falta do gesso (BARTL; ALBUQUERQUE, 1992 apud CANUT, 2006).

Devido ao grande volume produzido, o cuidado em armazenar, reutilizar e reciclar o fosfogesso vem crescendo ao longo do tempo, de acordo com estudos mundiais de todo o fosfogesso produzido, 14% são reprocessados, 58% são armazenados e 28% são descartados em lagos de sedimentação (RUTHERFORD et al, 1994; LYSANDROU; PASHALIDIS, 2008 apud VILLAVERDE, 2008).

Diversos materiais não têm normas específicas para serem utilizados, com isso, esses materiais tem um *déficit* quanto à sua aplicação e seu uso. Devido à ausência de norma específica que regulamente o uso do fosfogesso, o Brasil tem esse resíduo como um passivo ambiental e esse fator provoca um aproveitamento baixo, aproximadamente 90% da quantidade total disponível é descartado e o restante é usado estando diretamente concentrado na agricultura, nas indústrias de papel e de cimento (SAUEUA, 1998).

2.2 GERAÇÃO DO FOSFOGESSO

Todo produto gerado numa indústria passa por diversos processos. O ácido fosfórico, para ser produzido, passa por um processo de mistura de ácido sulfúrico com o concentrado fosfato, gerando um subproduto que é o fosfogesso.

Os estudos e a tecnologia buscam aplicar um meio reativo ideal com a finalidade de obter um volume máximo de ácido fosfórico na indústria. (AQUINO, 2005). Apresenta-se na Figura 02 um fluxograma simplificado que descreve o processo industrial da produção de ácido fosfórico.

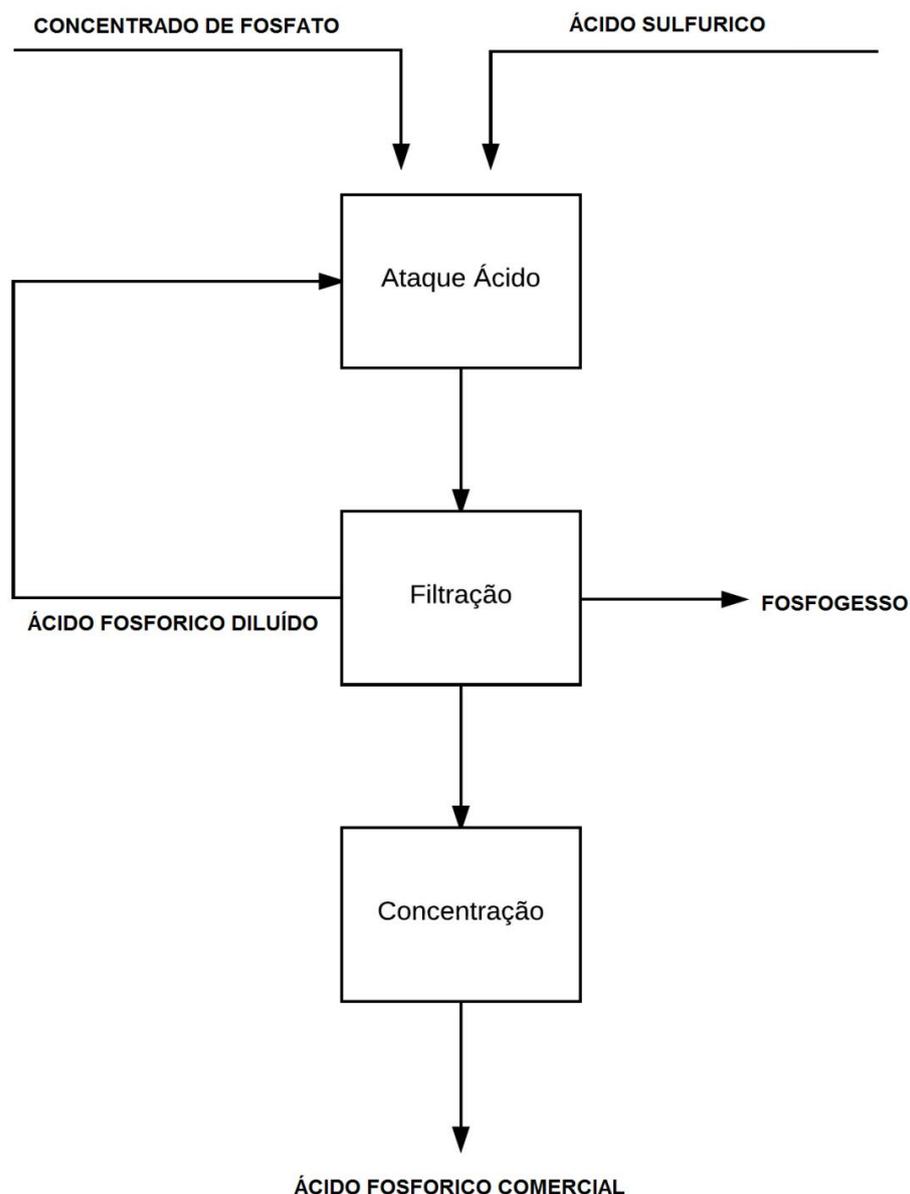


Figura 2: Fluxograma simplificado do processo industrial para a obtenção do ácido fosfórico e ponto de geração do fosfogesso.

Fonte: (Cekinski, 1990).

Um dos processos de produção de ácido fosfórico é conhecido como processo por via seca e o mesmo apresenta grande consumo de energia por utilizar fornos elétricos em alta potência. Durante o processo, o forno é aplicado a uma temperatura de aproximadamente 1300°C, depois passa por uma etapa de condensação e em seguida, acrescentando oxidado a P_2O_5 . A mistura do P_2O_5 com água produz o ácido fosfórico com alta pureza, que é utilizado no ramo farmacêutico e alimentício (VILLAVERDE, 2008).

Além do processo por via seca, existe também o processo por via úmida que é o mais utilizado hoje em dia. Estima-se que mais de 90% da produção de ácido fosfórico mundial utiliza esse processo por via úmida. (RUTHERFORD, 1994 apud VILLAVERDE, 2008). A maior vantagem do uso desse processo é o consumo de energia. Estima-se que o consumo médio de energia é cinco vezes menor do que o processo por via seca (VILLAVERDE, 2008).

Na Figura 3 tem-se a estrutura do processo de produção do ácido fosfórico no sistema via úmida, onde é realizada a reação da rocha fosfática com o ácido sulfúrico em, aproximadamente 70°C, passando por uma filtração para formar o produto final e o resíduo que é o fosfogesso (CANUT, 2006).

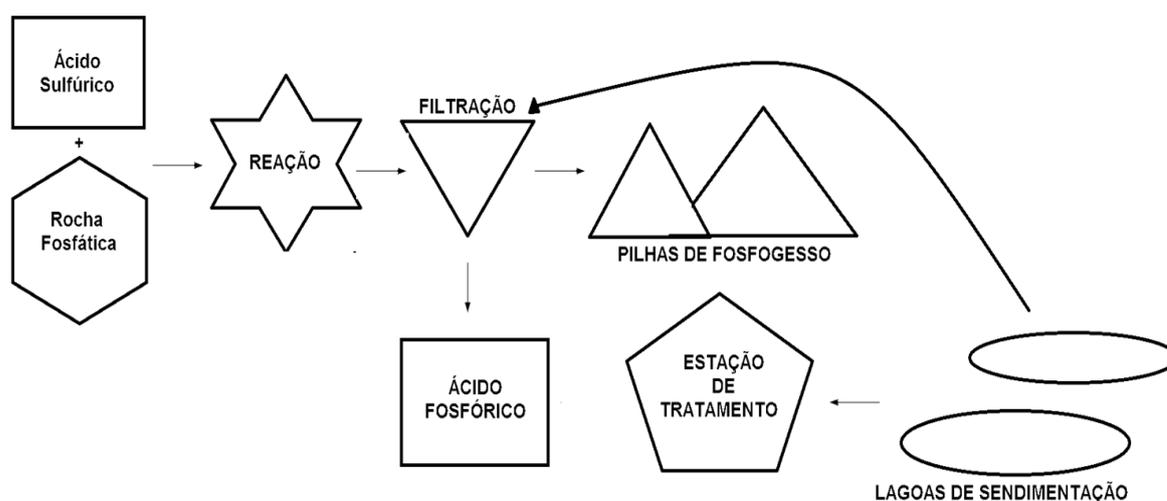
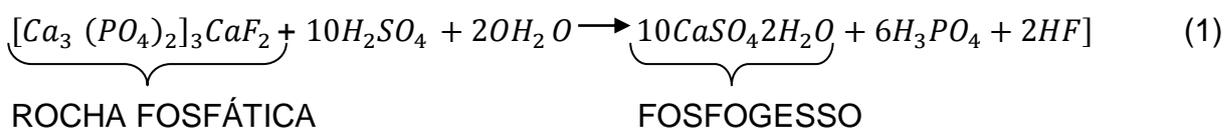


Figura 3: Processo de produção do ácido fosfórico e geração do resíduo fosfogesso.
Fonte: (Canut, 2006).

De acordo com Villaverde (2008), no processo por via úmida para a obtenção do fosfogesso e do ácido fosfórico é preciso tratar a rocha fosfática com ácido sulfúrico e água. Saueia (2006) retrata a reação detalhada (equação 1) gerada por esse processo.



2.3 APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO

Na região da Baixada Santista, na cidade de Cubatão, existem algumas indústrias que geram o resíduo porém, não há nenhuma norma específica que regulamente a utilização do fosfogesso, assim dificultando, cada vez mais, o incentivo ao estudo do material, no entanto, uma parte pequena do que é produzido é reutilizada e o restante, normalmente, é armazenado no local de produção sendo, habitualmente, colocado em grandes pilhas ao ar livre (VILLAVERDE, 2008).

Ilustra-se no Quadro 1 alguns estudos realizados com o fosfogesso.

Quadro 1: Pesquisas referentes ao fosfogesso.

Autor	Título do Trabalho
Shirley Minnell Ferreira de Oliveira	Estudo do comportamento Mecânico de Misturas de fosfogesso e cal para utilização na Construção Rodoviária (Mestrado)
Freddy Iazo Villaverde	Avaliação da Exposição externa em residência construída com fosfogesso (Mestrado)
Andréa Regina Kanelo Kobayashi e Alexandre Benetti Parreira	Avaliação da Influência do tipo de cimento na expansibilidade das misturas de fosfogesso e cimento (Artigo)
Hugo Vicente da Silva	Análise Experimental do fosfogesso como Isolante térmico através da transferência de calor por condução (Mestrado)
Mariana Moreira Cavalcanti Canut	Estudo da Viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção (Artigo)
Caroline Angulscki da Luz, Malik Cheriaf, Janaíde Cavalcante Rocha, Jean Ambroise e Jean Pera	Estudo de um cimento com baixo impacto ambiental (BIA) a partir de clínquer sulfoaluminoso e do fosfogesso (Artigo)
Talyta da Silva Curado e Lilian Ribeiro de Rezende	Ensaio Laboratoriais com fosfogesso para fins de Pavimentação (Ensaio)

2.3.1 Aplicação na agricultura

Atualmente, a agricultura é o setor que mais utiliza o fosfogesso. Normalmente conhecido como gesso agrícola, utilizado como um material nutritivo para as plantas proporciona auxílio para alguns processos físicos e químicos do solo, e, em especial, do solo com propriedades sódicas e solos argilosos utilizam o fosfogesso como condicionador para melhorar seu rendimento. Também contribui na infiltração de água no solo permitindo uma maior fluidez da água da chuva através da capilaridade, assim facilitando sua percolação, evitando, com isso, o

endurecimento do solo e, automaticamente, melhorando a germinação das sementes (NUERNBERGB et al, 2005 apud VILLAVERDE, 2008).

2.3.2 Aplicação na produção de cimento

O fosfogesso, quando extraído da indústria, carrega algumas impurezas que são materiais provenientes de sua geração. Na produção do cimento é preciso extrair todo material impuro contido no fosfogesso, pois o cimento precisa estar livre de impurezas para que não venha alterar a reação química das misturas de concreto e argamassa.

As indústrias de cimento do Brasil utilizam o fosfogesso na produção de cimento; o uso chega a aproximadamente 1,7 milhões de toneladas por ano (AQUINO, 2005 apud CANUT, 2006).

O fosfogesso, na indústria de cimento, entra no processo como um aditivo ao clínquer (material usado para produzir cimento Portland). As características físicas e químicas são semelhantes às do gesso, por isso torna-se rentável a substituição desses materiais, porém é preciso verificar a logística das indústrias (MAZZILLI et al, 2000 apud VILLAVERDE, 2008).

2.3.3 Aplicação na construção civil

Existem diversos materiais de construção civil no mercado, e a cada dia que passa surgem mais inovações. O fosfogesso tem grande semelhança com o gesso natural (gipsita), por essa razão o gesso pode ser substituído pelo fosfogesso no processo de fabricação de placas, painéis, entre outros materiais (HINCAPIE e CINCOTTO, 1997 apud VILLAVERDE, 2008).

2.4 DESCARTE DO FOSFOGESSO

O descarte do resíduo envolve diversos fatores relacionados ao custo, ou seja, o tipo de armazenamento final dependerá, primeiramente, da logística, de

acordo com a relação entre a fábrica onde é produzido e o local onde será feito o descarte. Atualmente, o descarte desse resíduo pode ser realizado de duas maneiras: disposição em pilhas ou bombeado para lagos de sedimentação, rios e oceanos (FREITAS,1992 apud CANUT, 2006).

A ordenação mais comum no fosfogesso é realizada “a úmido”; nesse procedimento, o fosfogesso e a água residual são descartados juntos, onde posteriormente são bombeados para lagos de sedimentação, depois de bombeado passa por um processo de decantação e em seguida é armazenado em pilhas (FREITAS,1992 apud CANUT, 2006).

Além da necessidade de grandes áreas vazias para a acumulação final do fosfogesso, o armazenamento desse resíduo gera grandes gastos para a empresa devido ao processo de armazenamento em pilhas onde é necessária a disposição de máquinas e funcionários (CANUT, 2006).

2.5 CLASSIFICAÇÃO DO FOSFOGESSO

Apesar de não existir uma norma que trate diretamente do fosfogesso, é possível classificar o mesmo através de algumas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (Quadro 02). Independentemente do tipo de resíduo, a classificação é extremamente importante, pois, a partir dela é possível ter uma decisão quanto ao processo de uso e descarte que será considerado.

Quadro 2: Normas para classificação de resíduos segundo a ABNT

Norma Brasileira (NBR)	TEMA
NBR 10004	Resíduos Sólidos - Classificação
NBR 10005	Lixiviação de Resíduos - Procedimento
NBR 10006	Solubilização de Resíduos - Procedimento
NBR 10007	Amostragem de Resíduos - Procedimento

Fonte: ABNT NBR 1004 (2004 p. 6).

Segundo a ABNT NBR 1004 (2004), a identificação do processo, os riscos no meio ambiente e à saúde, as características, entre outros fatores, estão ligadas diretamente na classificação de resíduo. A classificação do resíduo determina o tipo de armazenamento que será realizado, a maneira em que o resíduo deve ser

conduzido, entre outras aplicações. Tem-se no Quadro 3 a classificação dos resíduos quanto à classe, ao grau de perigo e o tipo de resíduo.

De acordo com os procedimentos e características em que a norma propõe o fosfogesso é classificado como um resíduo de classe II B – resíduo inerte

Quadro 3: Classificação de resíduos

CLASSE	GRAU DE PERIGO	TIPO DE RESÍDUO	
I	Perigosos	-	
II	Não perigosos	A	Não inerte
		B	Inerte

Fonte: ABNT NBR 1004 (2004 e p. 5).

2.6 RADIAÇÃO DO FOSFOGESSO

A crosta terrestre obtém os radionuclídeos das séries naturais ^{238}U , ^{232}Th e o ^{40}K , por consequência, as rochas fosfáticas utilizadas para a produção de fosfogesso contêm esses radionuclídeos (VILLAVERDE, 2008).

O fosfogesso normalmente contém ^{222}Rn em sua composição e a utilização desse resíduo pode provocar impactos radiológicos, devido à exalação do gás ^{222}Rn .

A exalação desse gás é um risco para a saúde humana por proporcionar doenças cancerígenas, a série de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th pode ser observada nas figuras seguintes (Figuras 4 e 5). “O gás radônio ^{222}Rn é resultado do decaimento do ^{226}Ra , uma impureza comumente encontrada no fosfogesso” (CANUT, 2006).

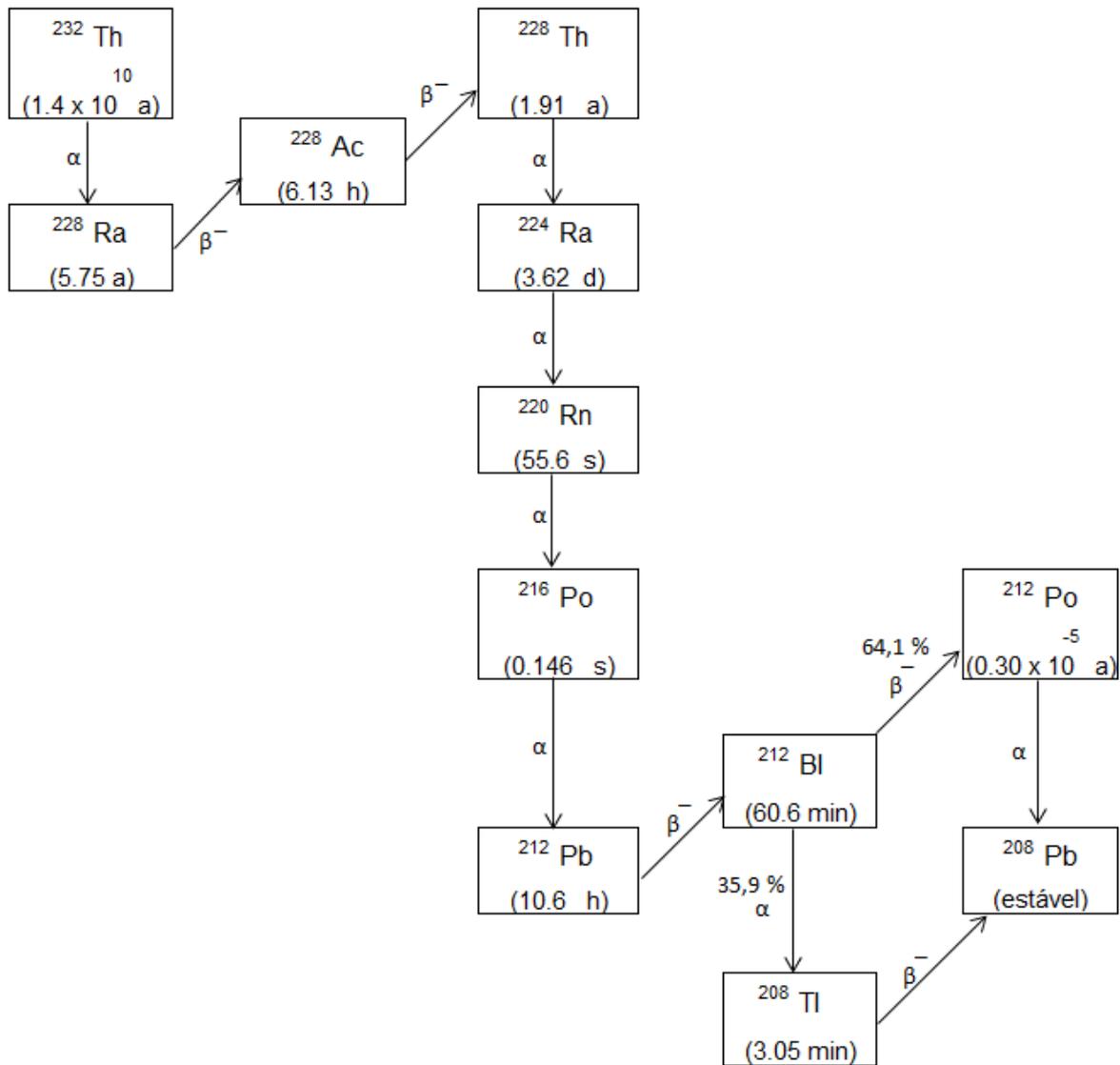


Figura 4: Fluxograma da série de decaimento do ^{232}Th

Fonte: (Mazzili, 2005).

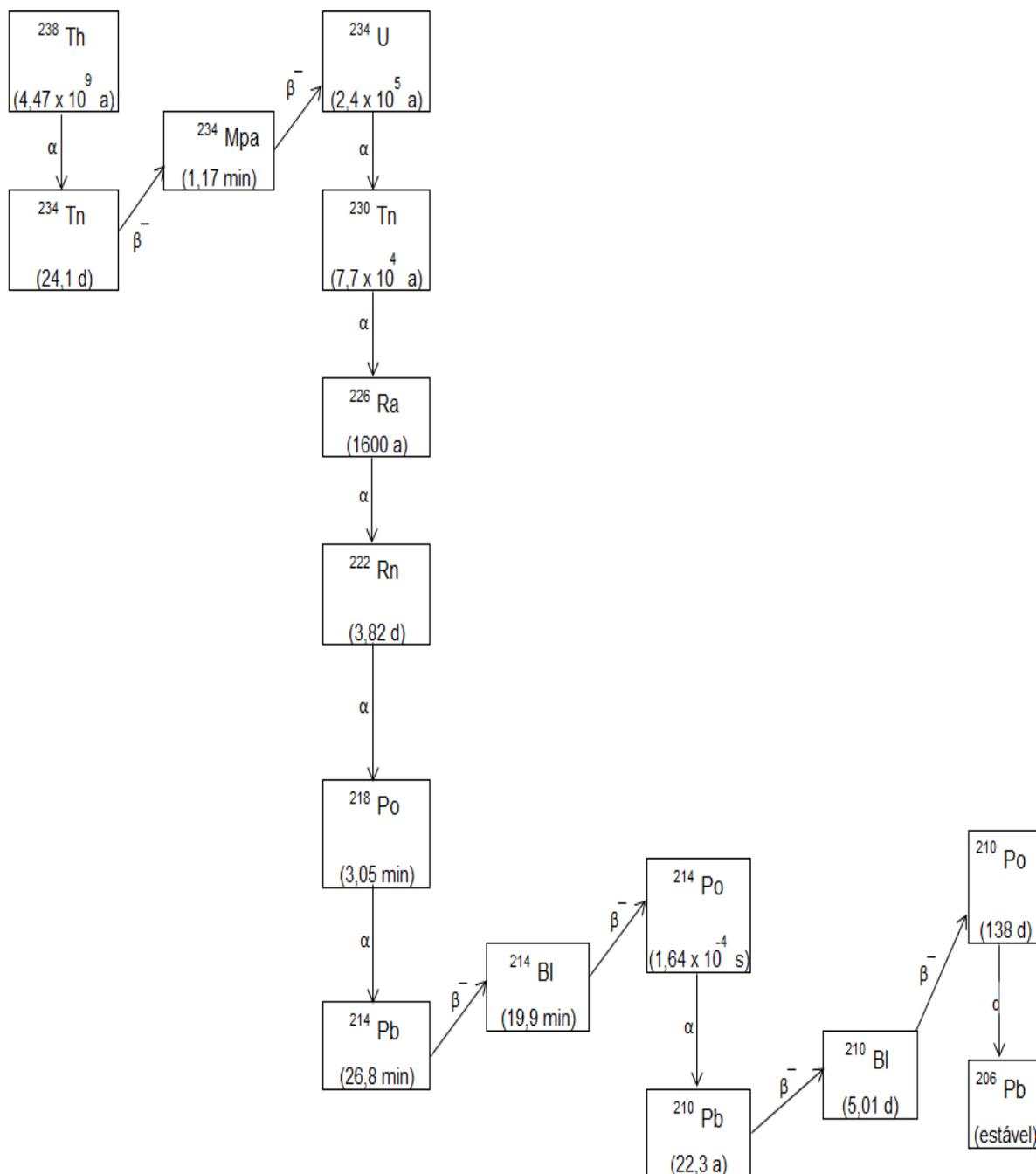


Figura 5: Fluxograma da série de decaimento do ²³⁸U.

Fonte: (Mazzilli, 2005).

No Brasil não existe um limite máximo de exalação de ²²²Rn estabelecido pelas normas, mas a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) estabelece a média de 0,74Bq/m²s (20pCi/m²s) nas pilhas de fosfogesso em território americano (CANUT, 2006).

A rocha fosfática (usada no processo de produção de ácido fosfórico gerador do fosfogesso) existente no Brasil denota baixos níveis de radiação natural,

inferiores ao limite prescrito pela USEPA, segundo medições realizadas e objetos de citações em diversas pesquisas publicadas (JACOMINO, 2003; SILVA, 2001; FREITAS, 1992; MAZZILI *et al*, 2000 apud CANUT, 2006).

Segundo Canut (2006), o baixo nível de exalação de ^{222}Rn da rocha fosfática Brasileira é por conta do alto teor do elemento tório, evidenciando que o teor de radionuclídeos existentes na rocha é influenciado pela característica geológica da rocha e do local onde a mesma é extraída.

2.7 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO

O concreto é um material resultante da mistura feita por cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo. A mistura dos materiais que formam o concreto é responsável pela resistência do mesmo.

No processo de mistura, o cimento ao entrar em contato com a água forma uma pasta que, após adicionar o agregado miúdo (areia), dá a forma da argamassa, que ao ser misturado no agregado graúdo (brita), forma o concreto. (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2015), os cuidados no momento da execução e o planejamento para o uso do concreto determinam se o concreto fresco está adequado para ser utilizado. É preciso que essa mistura seja feita com uma boa distribuição granulométrica para preencher os vazios que por ela fica. Os vazios resultam em porosidade, que por sua vez interfere na resistência do concreto e na permeabilidade.

Após fazer todo processo de misturas dos materiais, o concreto ganha forma e é dimensionado para receber esforços que o comprimem, pois, o concreto é altamente resistente à compressão. Para medir essa resistência é feito o teste de compressão axial com corpo de prova cilíndrico.

As propriedades do concreto determinam suas características, entre elas as mais analisadas são: resistência, qualidade, durabilidade da estrutura entre outros fatores que são a consistência, a trabalhabilidade, a homogeneidade, o adensamento, a pega e a cura do concreto. Essas propriedades estão relacionadas diretamente com os materiais usados para compor o concreto. Para determinar essas propriedades é preciso conhecimento específico na área e a utilização de

alguns ensaios. De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2015), para ter um concreto de boa qualidade é preciso ter um planejamento adequado, pois as propriedades do concreto estão ligadas no planejamento, ou seja, um bom planejamento gera um bom concreto.

Além dos materiais comuns que agregam o concreto existem aditivos que têm a finalidade de melhorar as propriedades do concreto. Esses aditivos são usados de acordo com a necessidade, que pode influenciar na cura, na trabalhabilidade e até mesmo na resistência final.

2.7.1 Concreto fresco

O uso do concreto depende de alguns fatores como tipo de estrutura, região onde o projeto será executado, preço, forças atuantes entre outros. Ele é usado em pequenas e grandes estruturas com a finalidade de suportar cargas que sobre ele são exercidas. No preparo do concreto estrutural tem-se como objetivo a obtenção de um material sólido que tenha uma alta resistência e que, os vazios que o formam sejam minimizados ao máximo tornando-o, assim, pouco poroso.

Carvalho e Figueiredo Filho (2015) afirmam que o concreto é um material heterogêneo devido à sua composição. Após todo processo de criação, o concreto entra numa fase de endurecimento onde se mantém com as mesmas propriedades heterogêneas.

O concreto, quando está em seu estado final de endurecimento, atinge determinada resistência e essa resistência se relaciona com diversos fatores, inclusive com os espaços vazios que compõe o concreto. Os vazios do concreto afetam positivamente e negativamente, portanto, levando-se isso em consideração, é preciso alcançar a maior massa específica possível para que tenha boa resistência.

2.7.2 Consistência do concreto

A consistência do concreto é uma característica muito importante, pois ela determina como o concreto irá se relacionar no processo de transporte para o seu

uso final, e está ligada diretamente na relação de dosagem de água e agregado. Essa consistência é determinada pela ABNT NBR NM 67:1998.

Dentre diversas características, a consistência do concreto depende de uma série de fatores que começa na separação dos materiais. A água utilizada para fazer o concreto precisa estar na dosagem correta exigida pelo traço para que não haja um excesso de água em seu concreto. O procedimento de transporte do concreto deve ser feito de maneira adequada, respeitando as normas e procedimentos e a granulometria dos agregados, entre outros fatores que estão ligados diretamente na consistência do concreto. A consistência determinará a maior ou menor capacidade de deformação do concreto (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

Para adquirir boa consistência é preciso que a relação a/c (água/cimento) esteja equilibrada.

Ambrozewicz (2012) destaca que a consistência do concreto influencia na trabalhabilidade do mesmo, e que o concreto deve ter uma consistência adequada para que possa assegurar um bom lançamento na hora da concretagem, sem que haja uma desunião dos materiais.

2.7.3 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade tem relação com o *Slump Test* e a grandeza de abatimento, que determina a facilidade de manuseio com o qual o concreto pode ser manipulado pelo operário sem segregação (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

2.7.4 Homogeneidade

Homogeneidade é uma das propriedades do concreto que está relacionada na mistura dos componentes que o formam. A mistura feita de maneira correta faz com que o concreto tenha uma forma sem segregação dos componentes. Os agregados que contém regularidade em sua forma, conseqüentemente, fazem um preenchimento melhor dos espaços vazios do concreto, gerando uma permeabilidade melhor, entre outros benefícios.

2.7.5 Adensamento do concreto

O adensamento é um processo que tem por objetivo evitar a formação de bolhas de ar no concreto e desagregação do material de forma inadequada. Pode ser manual, por socamento ou processos mecânicos.

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2015), o processo mais usual para obter um bom adensamento é a vibração mecânica, realizada através de vibradores manuais aplicados na massa do concreto.

De acordo com a ABNT NBR 14931 (2004), quando se utiliza vibrador de imersão, o mesmo tem que penetrar numa profundidade de 10 cm na camada anterior e a espessura da camada de concreto tem que ser aproximadamente a $\frac{3}{4}$ do comprimento da agulha.

A vibração do concreto é extremamente importante, porém é preciso acompanhar esse procedimento, pois tanto a falta como o excesso de vibração têm certa influência na estrutura física no concreto.

Segundo as especificações da ABNT NBR 14931 (2004), devem ser tomados os seguintes cuidados durante o adensamento (Figura 6) com vibradores de imersão:

- a. Preferencialmente aplicar o vibrador na posição vertical;
- b. Vibrar o maior número possível de pontos ao longo do elemento estrutural;
- c. Retirar o vibrador lentamente, mantendo-o sempre ligado, a fim de que a cavidade formada pela agulha se feche novamente;
- d. Não permitir que o vibrador entre em contato com a parede da fôrma, para evitar a formação de bolhas de ar na superfície da peça, mas promover um adensamento uniforme e adequado de toda a massa de concreto, observando cantos e arestas, de maneira que não se formem vazios;
- e. Mudar o vibrador de posição quando a superfície se apresentar brilhante.

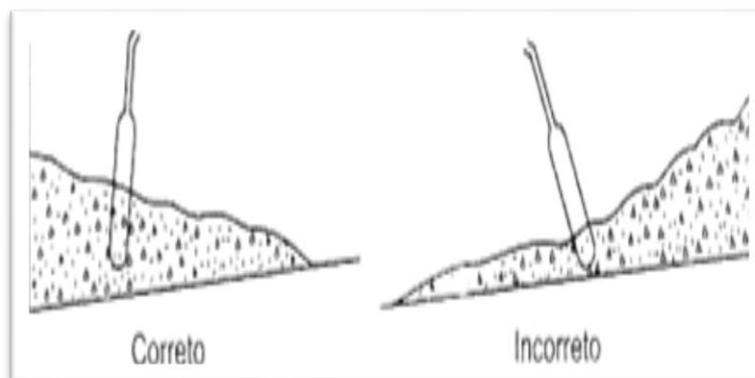


Figura 6: Adensamento do concreto com vibradores de imersão.
 Fonte: ABNT NBR 14931, (2004, p. 21).

Segundo a ABNT NBR 5738 (2003), o adensamento deve ter certa compatibilidade com a consistência do concreto, através do valor obtido do *slump* é possível determinar o tipo de processo de adensamento que será utilizado para vibrar o concreto. (Tabela 1)

Tabela 1: Processo de adensamento

Abatimento "a" (mm)	Processo de adensamento
$a < 20$	Vibratório
$20 \leq a < 60$	Manual ou vibratório
$60 \leq a < 180$	Manual
$a > 180$	Manual

Fonte: ABNT NBR 5738 (2003, p. 4).

2.7.6 Início do endurecimento do concreto (Pega)

De acordo com a (ABNT NBR 14931 2004), quando a concretagem for efetuada em temperatura ambiente muito quente ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) e, em especial, quando a umidade relativa do ar for baixa ($\leq 50\%$) e a velocidade do vento alta (≥ 30 m/s), devem ser adotadas as medidas necessárias para evitar a perda de consistência e reduzir a temperatura da massa de concreto.

Poucas horas após a construção do concreto, o mesmo entra na fase de endurecimento. A pega do concreto é o intervalo entre o início do endurecimento até

o concreto atingir certa consistência para que possa ser deformado, sem afetar sua resistência e a sua forma. (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

Segundo a NBR NM 65 (2002), o tempo de início de pega, em condições de ensaios normalizados, é o intervalo de tempo transcorrido desde adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de vicat correspondente penetra na pasta, até uma distância de (4 ± 1) mm da placa base.

2.7.7 Cura do concreto

O concreto é feito pela a junção de diversos materiais, inclusive água. Após a fabricação do concreto, começa o processo de cura. O início desse processo é chamado de pega, em seguida o concreto começa o sistema de cura. Essa cura faz com que a água existente no concreto escoe pelos vazios e entre na metodologia de evaporação e a hidratação do concreto progrida, com grande velocidade, logo após o início da pega (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

De acordo com a ABNT NBR 14931 (2004), o concreto precisa atingir um grau de endurecimento total para que possa ser usado adequadamente, caso não tenha atingindo esse endurecimento é preservar o mesmo para que não seja prejudicado por alguns fatores, como a perda de água pela superfície exposta, e certificar uma resistência adequada entre outros. A cura final do concreto permite que o mesmo seja deformado para um uso adequado.

2.7.8 Resistência característica do concreto (f_{ck})

Resistência, característica do concreto, é um dado imprescindível para o cálculo de qualquer peça estrutural ou obra de concreto, pois é esse valor que norteia o tipo de carregamento que será suportado pela estrutura, sua média é o MPa (Mega pascal), e quanto maior a idade do concreto maior é sua resistência.

2.7.9 pH do concreto

O concreto possui meio alcalino (pH= 12 a 13,5), inibe a corrosão do aço das armaduras (proteção química) formando uma película apassivadora de óxido de ferro. Há alguns fatores que contribuem para a alteração do pH deixando mais suscetível a corrosão das armaduras e ataques químicos como presença de íons, lixiviação na pasta de cimento e carbonatação. Nas análises patológicas é preciso encontrar o grau de alcalinidade ou acidez do meio, mediante a determinação do pH, sabendo que os meios serão neutros, básicos ou ácidos.

2.8 CARACTERIZAÇÕES DOS AGREGADOS E MATERIAIS DO CONCRETO

2.8.1 Cimento

O cimento é um dos materiais mais usados atualmente numa obra. Ele tem o formato de um pó fino em cores diversas e é vendido em sacos de 50Kg contendo variados tipos e marcas. Segundo Neville e Brooks (2013), o nome do cimento adquirido através da mistura de argila, calcário, materiais silícios entre outros é Cimento Portland.

Na construção civil, o cimento é um dos materiais mais importante, pois é um dos materiais que compõe o concreto junto com agregados miúdos e graúdos.

A água é o principal componente de reação com o cimento, por essa razão a granulometria do cimento influencia nessa reação. O cimento mais fino tem uma reação mais rápida e consegue atingir uma resistência a compressão maior, especialmente nos primeiros dias (AMBROZEWICZ, 2012, p.81).

2.8.2 Tipos de cimento

Atualmente, no mercado, existem 11 tipos de cimento que atendem a qualquer necessidade. Por normas e parâmetros, a nomenclatura do cimento é composta por iniciais.

Segundo Ambrizewicz (2012), na nomenclatura do cimento é possível encontrar as letras CP que significam Cimento Portland; após essas duas letras haverá algum algarismo romano que pode ter a variação entre I e V, depende de cada tipo de cimento; após as letras CP e os algarismo vem um número que determina sua classe podendo ser 25, 32 ou 40. Essa classe indica a resistência à compressão do cimento feito em corpo de prova padrão, dado em unidade de MPa.

Diversos são os tipos de cimento utilizados no dia a dia de uma obra. (Quadro 4)

Quadro 4: Nomenclatura dos cimentos Portland.

NOME TÉCNICO		SIGLA	CLASSE	IDENTIFICAÇÃO DO TIPO E CLASSE
Cimento portland comum (NBR 5732)	Cimento portland comum	CP I	25	CP I – 25
			32	CP I – 32
			40	CP I – 40
	Cimento portland comum com adição	CP I - S	25	CP I - S – 25
			32	CP I - S – 32
			40	CP I - S – 40
Cimento portland composto (NBR 11578)	Cimento portland composto com escória	CP II - E	25	CP II - E – 25
			32	CP II - E – 32
			40	CP II - E – 40
	Cimento portland composto com pozolana	CP II - Z	25	CP II - Z – 25
			32	CP II - Z – 32
			40	CP II - Z – 40
	Cimento portland composto com filer	CP II - F	25	CP II - F – 25
			32	CP II - F – 32
			40	CP II - F – 40
Cimento portland de alto-forno (NBR 5735)		CP III	25	CP III – 25
			32	CP III – 32
			40	CP III – 40
Cimento portland pozolânico (NBR 5736)		CP IV	25	CP IV – 25
			32	CP IV – 32
Cimento portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V-ARI	-	CP V-ARI
Cimento portland resistente aos sulfatos (NBR 5737)		-	25	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS. Exemplo: CP I-32RS, CP II-F-32RS, CP III-40RS etc.
			32	
			40	
Cimento portland de baixo calor de hidratação (NBR 13116)		-	25	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC. Exemplo: CP I-32BC, CP II-F-32BC, CP III-40BC etc.
			32	
			40	
Cimento portland branco (NBR 12989)	Cimento portland branco estrutural	CPB	25	CPB – 25
			32	CPB – 32
			40	CPB – 40
	Cimento portland branco não estrutural	CPB	-	CPB
Cimento portland para poços petrolíferos (NBR 9831)		CPP	G	CPP - classe G

Fonte: Ambrizewicz, (2012, p. 459).

2.8.3 Água

A água é o material mais usado na construção civil, desde o início até o fim de uma construção. Apesar de não ser vista com um material de construção, esse líquido faz parte dos materiais que compõem o concreto e tem grande responsabilidade perante a resistência do mesmo.

O concreto é composto por diversos materiais, inclusive a água e é preciso uma quantidade ideal de cada material que compõe o concreto, para que o mesmo possa atingir boa resistência e uma trabalhabilidade satisfatória.

Segundo Neville e Brooks (2013), a água deve conter ótima qualidade, pois as impurezas da água podem prejudicar o concreto na pega do cimento, afetando diretamente a resistência do concreto e as impurezas podem manchar e proporcionar a corrosão da armadura, caso seja concreto armado.

De acordo com Ambrozewicz (2012), “a NB-1 prescreve que a água destinada ao amassamento do concreto deverá ser isenta de teores prejudiciais de substâncias estranhas”. A Norma NBR 15900/2009 demonstra os parâmetros estabelecidos para o grau de cloreto que pode conter a água de acordo com o tipo de concreto que será preparado.

2.8.4 Agregado

Agregado é um material granular, sem forma ou volume definido, de atividade química geralmente inerte, utilizado principalmente na construção civil (AMBROZEWICZ, 2012).

O agregado tem propriedade e granulometria diversas que são ideais na produção de concreto e de outros serviços da engenharia civil. Neville e Brooks (2013) afirmam que por volta de $\frac{3}{4}$ do volume total do concreto são ocupados pelos agregados (miúdos e graúdos), por esse fator é possível enxergar que os agregados têm grande importância na composição do concreto e os mesmos devem ter boa qualidade.

A classificação dos agregados é obtida através dos tamanhos dos fragmentos, onde os mesmos são divididos como: agregados miúdos e agregados graúdos. Os limites quanto aos diâmetros que determinam o tipo de agregado são dados pela ABNT NBR 7211:(2005).

A ABNT NBR 7211 (2005) afirma que os agregados devem ter boa qualidade e que sua composição tem que ser de grãos de minerais duros, compactos, duráveis e limpos, não podendo comportar substâncias de natureza e em qualidade ruim para que não afete a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura em relação à corrosão, a durabilidade e a aparência visual externa do concreto.

2.8.5 Agregado miúdo

O agregado miúdo é usado para diversos serviços na construção civil. No concreto, ele é denominado como areia fina ou média e tem suma importância para atingir a resistência necessária.

Algumas normas técnicas regulam a classificação dos agregados através de testes, por exemplo, teste com peneiras onde o agregado passa por determinadas peneiras e, após esse procedimento, é possível classificar o agregado.

Segundo Ambrozewicz (2012), agregado miúdo é a areia natural ou o britamento de rochas estáveis, dos quais os maiores grãos passam no mínimo 85% às malhas da peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 µm (AMBROZEWICZ, 2012).

2.8.6 Agregado graúdo

O agregado graúdo também é extremamente importante na composição do concreto. Além das suas propriedades, o seu tamanho proporciona uma característica mais robusta ao concreto. Esse tipo de agregado, como o nome já diz, é maior que o agregado miúdo. O teste para a classificação desse material é semelhante ao teste do agregado miúdo e ambos visam definir a granulometria do material.

Segundo Ambrozewicz (2012), é definido como brita ou pedregulho os agregados cujos grãos contêm diâmetro que permite transpassar pela peneira de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm (85%).

2.8.7 Teor de umidade dos agregados

Teor de umidade é a característica física dos agregados, isto é, retrata a quantidade de água por unidade de massa de cada material, onde quantificando o material de água retido nele. A determinação do teor de umidade é procedimento fundamental e indispensável para qualquer análise com agregados de acordo com ABNT NBR 16097/2012.

2.8.7.1 Densidade aparente do agregado

A densidade aparente de um agregado é a razão entre a massa e seu peso específico, identificada sua unidade de volume; obtém-se essa densidade aparente através do DNER nos ensaios de determinação da absorção e densidade do agregado. É necessário determinar a densidade para parâmetro de dosagem dos agregados na mistura do concreto.

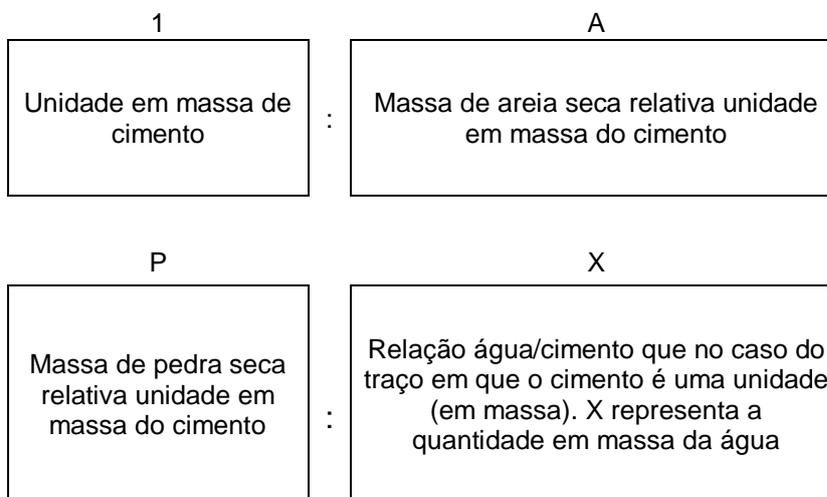
2.9 TRAÇO DE CONCRETO

O traço é o nome dado à receita do concreto, ou seja, a quantidade que cada componente terá. (Quadro 5)

O concreto utiliza um conjunto de materiais com diferentes granulometrias essa diferença de tamanho dos agregados proporciona o preenchimento dos vazios que por eles passam, a fim de atingir determinada resistência. Para adquirir certa resistência, são realizados estudos que determinam a dosagem ideal de cada material que compõe o concreto. Essa dosagem é chamada de Traço.

Quadro 5: Traço do concreto

TRAÇO EM MASSA



2.10 CONSISTÊNCIA DO CONCRETO PELO ABATIMENTO DO TRONCO CONE (SLUMP TEST)

Esse método determina a consistência do concreto fresco através da medida de seu amassamento. De acordo com NBR NM 36, o método é aplicável aos concretos plásticos e coesivos que apresentem um assentamento igual ou superior a 10 mm, como resultado do ensaio realizado de acordo com esta Norma.

O *Slump Teste* constata o abatimento do concreto e a trabalhabilidade do mesmo.

Este ensaio, diferente de muitos, não exige ser feito em um laboratório específico, afinal os equipamentos são simples e fáceis de serem transportados, podendo ser realizado diretamente na obra.

De acordo com Neville (1997), existe uma correlação entre o *slump test* e a trabalhabilidade, onde é possível verificar se a trabalhabilidade do concreto será muito alta ou muito baixa. Mostra-se na Tabela 2 a relação entre trabalhabilidade e grandeza de abatimento.

Tabela 2: Relação entre trabalhabilidade e grandeza de abatimento.

TRABALHABILIDADE	ABATIMENTO (mm)
Abatimento zero	0
Muito baixa	5 a 10
Baixa	15 a 30
Média	45 a 75
Alta	80 a 155
Muito alta	160 ao desmoronamento

Fonte: ABNT NBR NM 67: (1998, p.7).

A NBR NM 67 (1998), que trata do teste de abatimento, tem algumas especificações quanto às dimensões do equipamento usado para a realização do teste.

As especificações de acordo com a normalização no Mercosul 67 de 1998, são apresentadas nas Figuras 7,8 e 9.

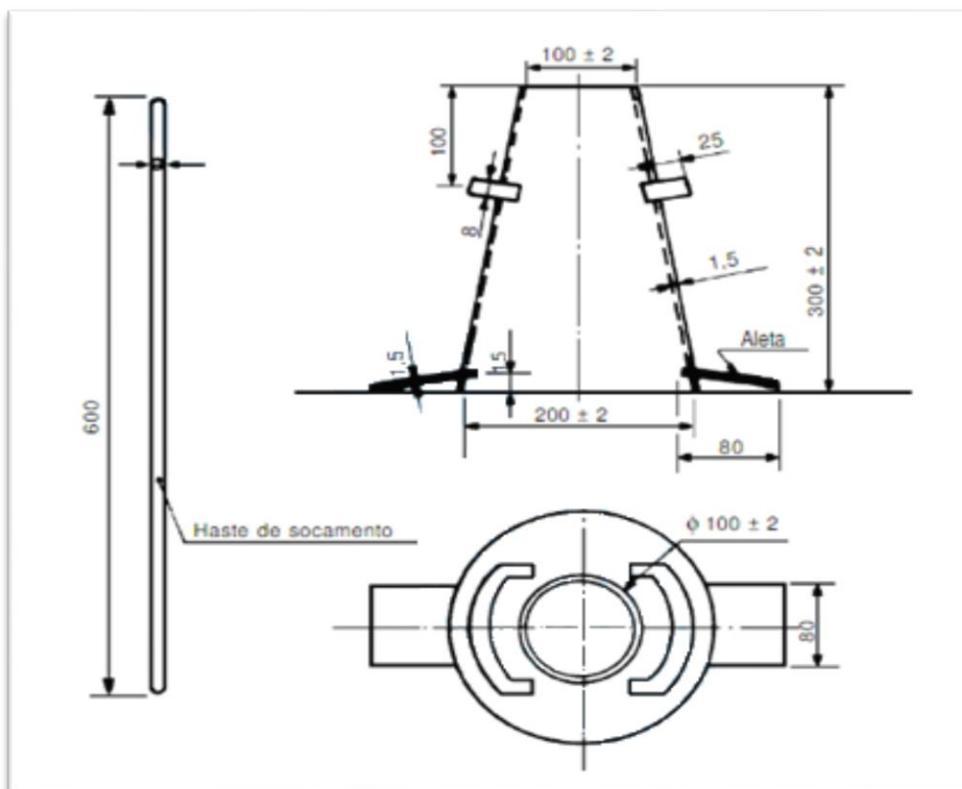


Figura 7: Dimensões do Molde.
 Fonte: ABNT NBR NM 67: (1998, p. 6).

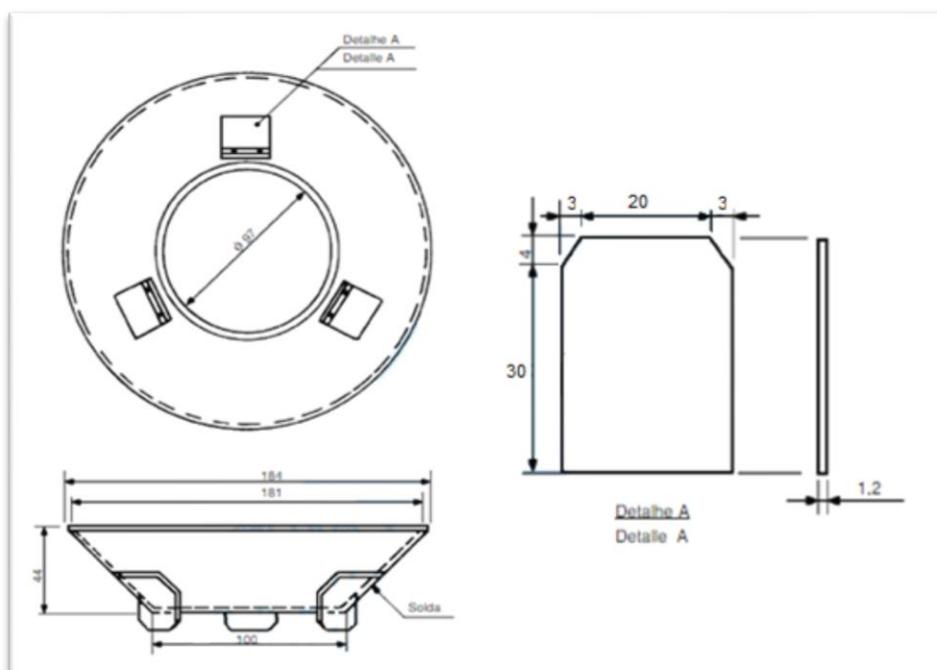


Figura 8: Complemento tronco-cônico metálico de enchimento, adaptável à base superior do molde.

Fonte: ABNT NBR NM 67: (1998, p.7).

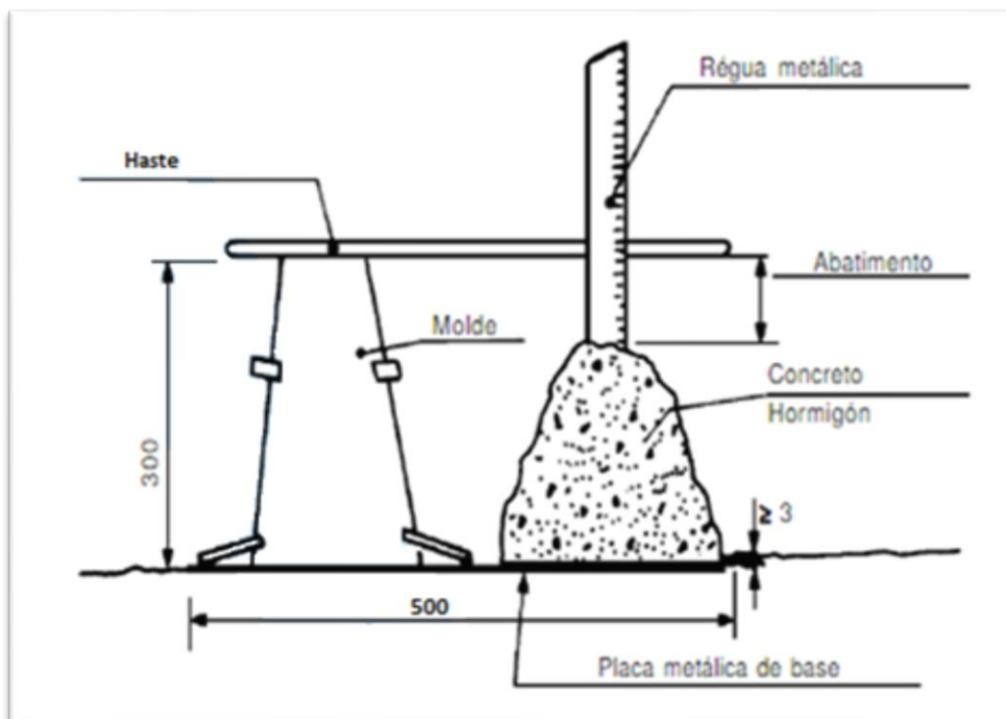


Figura 9: Medida do abatimento.
 Fonte: ABNT NBR NM 67: (1998, p.8).

Conforme Ambrozewicz (2012), o procedimento para a realização do *Slump Teste* segue 6 passos determinados de a ao f.

- a. Umedecer as paredes internas do molde e da placa;
- b. Montar o equipamento (placa, molde e colarinho), apoiar os pés sobre as aletas do molde e preenchê-lo em três camadas de volumes aproximadamente iguais, adensando cada camada antes da colocação seguinte;
- c. Adensar cada camada com 25 golpes, uniformemente distribuídos pela haste de socamento, de modo atinja a camada anteriormente adensada;
- d. Manter um excesso constante de concreto na borda superior ao adensar a última camada;
- e. Retirar o colarinho e rasar a superfície;
- f. Pressionar as alças do molde para baixo, retirar os pés das aletas e, num tempo de 5 a 10 s, levantar cuidadosamente o molde, na direção vertical.

2.10.1.1 Classificação do Teste de Abatimento (*Slump Test*) do concreto

O abatimento, conhecido também como *Slump*, é obtido através do teste de abatimento de tronco cone. A medida do abatimento define como está a consistência do concreto (Figura 10), podendo atingir três formas que são: abatimento verdadeiro, cisalhamento e desagregação.

O abatimento verdadeiro é quando o conjunto dos materiais simplesmente diminuiu a altura, tendo certa semelhança com sua forma original sem perder sua estrutura física. O cisalhamento é quando parte do concreto tomba para o lado por alguns fatores provenientes do traço como excesso de algum material entre outros.

A desagregação acontece quando por conta da falta de coesão dos agregados, fazendo com que o concreto ceda completamente perdendo toda sua forma inicial.

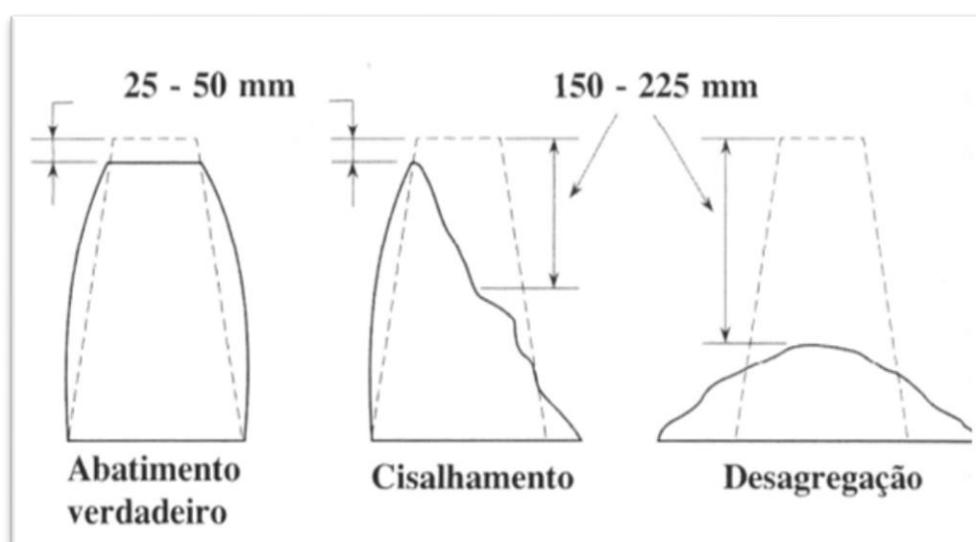


Figura 10: Formas de abatimento: correto (a); cisalhamento (b) e desagregação (c).
Fonte: Neville, (1997, p.84).

O abatimento verdadeiro e o cisalhamento podem acontecer com o mesmo traço de concreto. No caso de um cisalhamento, é preciso refazer o teste, pois pode ser oriundo dos materiais ou do próprio teste realizado. Se persistir no cisalhamento deve-se rever as condições dos materiais existente no traço e a dosagem dos mesmos. O abatimento verdadeiro é o único que apresenta validade para a utilização do concreto. O abatimento desagregado deve ser medido e anotado com muita precisão (YAZIGI, 1997).

Segundo Andolfato (2002), a consistência do concreto tem certa relação com a dosagem de matérias utilizada na preparação do mesmo. Peça de concreto mais fina e fortemente armada tem a necessidade de um concreto mais mole, que possa fluir de maneira que todos os espaços sejam preenchidos de concreto, diferente de peças maiores e com grandes espaçamentos entre a armação.

Nessas condições, Andolfato (2002) determina a consistência do concreto pelo abatimento conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Classificação das consistências do concreto

CONSISTÊNCIA	ABATIMENTO (cm)
Seca	0 a 2
Firme	2 a 5
Média	5 a 12
Mole	12 a 18
Fluída	18 a 25

Fonte: ABNT NBR NM 67: (1998, p.4).

2.11 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO ATRAVÉS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL.

Este ensaio é o mais usado para o controle da resistência do concreto, tanto pela facilidade de execução e baixo custo, quanto pela sua importância na segurança das estruturas. Trata-se de um método destrutivo onde extraímos a resistência à compressão do concreto através de uma prensa, expondo um corpo de prova (15 cm de diâmetro de base e 30 cm de altura) a uma carga vertical, até que ele se rompa. Assim, pode-se obter uma referência à resistência à compressão de acordo com o tempo que ela leva para romper e a quantidade de carga que ela aguenta.

Para caracterizar de forma qualificativa o experimento, deve-se seguir um padrão de qualidade estabelecido pela ABNT e um traço convencional para critério de comparação com o traço experimental, observando a qualidade de cada material usado (areia média, cimento, brita e água) para que haja uma boa pega nos elementos quando misturados. Isto é importante para o seguimento do experimento, pois a qualidade do material influencia diretamente na resistência do corpo de prova.

O desmolde dos corpos de provas são realizados a partir de 7 e 28 dias, de acordo com o fck desejado.

Para calcular o volume do corpo de prova é usada a equação (2)

$$A_c = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2)$$

Sendo:

A_c a Área do corpo de prova (m^2)

d o Diâmetro (m)

Para o cálculo da tensão é usada a equação (3)

$$T = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Sendo:

T a Tensão (Kg/cm^2)

F a Força de compressão (N)

Os resultados serão demonstrados em MPa, sendo necessário à sua conversão pela equação (4)

$$MPa = \frac{1}{10} \times \frac{Kg}{cm^2} \quad (4)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

Na montagem física do trabalho foram utilizados os programas: *Microsoft Word* (edição de texto), *Microsoft Excel* (planilhas), *Corel Draw* (edição de fotos) e *Cute FTP Writer* para impressão em arquivo PDF.

O estudo obteve uma abordagem qualitativa e evidenciando as análises experimentais que foram realizadas no laboratório de engenharia civil da Universidade Santa Cecília e Universidade de Ribeirão Preto-Campus Guarujá.

Para o estudo, foi reproduzido um traço de concreto com abatimento e resistência conhecida, carta de traço fornecida pela empresa Falcão Bauer, especialidade em controle tecnológico de concreto, posteriormente acrescentando porcentagens diferentes de fosfogesso, onde foi analisado o teste de abatimento de concreto e ensaio de compressão axial, sendo possível, com isso, saber como será o comportamento quanto à trabalhabilidade, consistência e à sua resistência, no momento da utilização dele na obra.

A análise realizada no concreto foi dividida em quatro partes.

No primeiro momento, foi realizado e analisado um concreto convencional denominado amostra 1. Após o preparo do concreto, foi realizado ensaio de abatimento para saber a sua real consistência, em seguida foram preenchidos quatro corpos de prova para medir sua resistência após 7 e 28 dias.

No segundo momento foi realizado o traço de concreto na ordem 10% de fosfogesso e 90% de areia, denominado amostra 2, no terceiro momento foi realizado o traço de concreto na ordem de 20% de fosfogesso e 80% de areia, denominado amostra 3, no quarto momento foi realizado o traço de concreto na ordem de 30% de fosfogesso e 70% de areia, denominado amostra 4.

3.1 DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO FOSFOGESSO

O Concreto é composto por vários materiais com granulometria diferentes. O fosfogesso, apesar de não ser um agregado miúdo comum na construção civil, consiste de uma granulometria muito fina em relação a alguns materiais como brita, areia grossa, entre outros.

É importante saber a granulometria do material que é utilizado no concreto, pois esse fator está relacionado diretamente na consistência e resistência do mesmo. Os agregados são classificados de acordo com sua dimensão. Conforme as características do fosfogesso a sua classificação, quanto à granulometria, é dada por um processo padronizado de peneiras, onde são utilizadas peneiras de números 32, 42, 50, 60, 100, 140 e 200. Para a classificação é usada a norma DER/SP M 6-61, que rege a análise granulométrica de solos por peneiração e sedimentação e a ABNT NBR 12127 (1991) que determina às propriedades físicas do pó em relação ao gesso.

De acordo com o ensaio realizado em laboratório determinado pela NBR 7217 para classificação granulométrica, foi usado o agitador vibratório (Figura 11) onde se encaixam as peneiras, previamente limpas, de modo a formar um conjunto de 7 peneiras, com abertura em malha em ordem crescente da base ao topo. Foi colocada a amostra de 1200 gramas sobre a peneira superior e após, tampou-se o recipiente para que não houvesse fuga do material, ligando o agitador vibratório mecânico por um tempo razoável para permitir a separação do material. Depois disso, foi retirado o material retido de cada uma das peneiras e o material passante, sequencialmente pesado para determinar a massa do material retido e passante, obtendo a porcentagem e a classificação do material.

Identificou-se com o experimento que o fosfogesso passou pelo processo de peneiras e ficaram retidos nas peneiras #140 e #200, onde são consideradas as peneiras mais finas. Segundo (Matos, 2011), o fosfogesso é classificado como material pertencente à classe dos Siltes, pois varia sua granulometria de 0,005mm a 0,05mm, de acordo com informações sobre limites de frações de solo pelo tamanho dos grãos segundo ABNT.



Figura 11: Agitador Mecânico.

3.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DO FOSFOGESSO

A densidade aparente de um material é a razão entre a massa e o volume do material, ou como descrito pelo DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico “Relação entre massa do agregado seco em estufa até constância de massa e o volume igual do sólido, incluídos os poros impermeáveis” (DNER-ME 194/98 p. 02, 2014). Pelo fato preponderante do nosso agregado miúdo fosfogesso não ser um material usual, para encontrar essa massa específica foi realizado o ensaio de determinação densidade aparente, para comparação com resultados das análises físicas encontrados em dissertações (TAHA & SEALS, 1991), onde referenciou a densidade específica de 2,35 e a massa específica de 2,26 g/cm³.

Os materiais utilizados nos ensaios foram (Figura 12 e 13):

- a. Balança de precisão
- b. Espátula

- c. Funil
- d. Pipeta
- e. Pá
- f. Estufa.



Figura 12: Balança de precisão.



Figura 13: Estufa.

Iniciou-se o ensaio com a secagem da amostra de fosfogesso em estufa a 110°C até constância de massa, depois foram retiradas duas amostras e pesadas, respectivamente, nos valores de 27,40 gramas e 26,79 gramas, adicionando água deionizada na proveta até a marca estabelecida de 100 milímetros cúbicos. Introduziu-se, cuidadosamente, a primeira amostra de fosfogesso com auxílio de um funil, agitando para dissipação de ar, e assim indicando o deslocamento do nível de água pelo fosfogesso.

No primeiro ensaio o deslocamento foi de 10 milímetros utilizando a equação (5) da densidade aparente.

$$d = \frac{M}{V} \quad (5)$$

Sendo:

d a Densidade aparente

M a Massa

V o Volume

Substituindo os valores na equação, obteve-se na primeira amostra, a densidade aparente 2,28g/cm³. No segundo experimento, o deslocamento também foi de 10 milímetros resultando na densidade igual a 2,23g/cm³.

3.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Deu-se início ao experimento com a retirada de 200,03 gramas de fosfogesso e 200,18 gramas de areia média para secagem em estufa para se obter o teor de umidade, de acordo com as Figuras 14 e 15 e de acordo com ABNT NBR 16097.



Figura 14: Amostra de fosfogesso e areia.



Figura 15: Estufa com amostras de fosfogesso e areia.

Nas Figuras 16 e 17 podem-se observar as massas para efetuar o cálculo do teor de umidade em porcentagem.



Figura 16: Massa seca da área média mais tara da balança.



Figura 17: Massa seca do fosfogesso mais tara da balança.

A massa do recipiente do fosfogesso foi de 344,42 gramas, subtraindo a massa seca de 504,16 gramas, obteve-se o valor de 159,74 gramas, uma vez que o recipiente da areia média foi de 421,88 gramas, subtraindo a massa seca de 615,80 gramas, determinou-se o valor do peso seco do material 193,92 gramas.

$$\% \text{ umidade} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

P_i o Peso do recipiente

P_f o Peso seco do material

3.4 TRAÇO DE CONCRETO DESENVOLVIDO PARA O EXPERIMENTO

O traço utilizado na pesquisa foi fornecido pelo laboratório de controle tecnológico da Empresa Falcão Bauer (1:2,42:2,34:0,60) com uma consistência média e resistência característica no concreto de 20MPa.

Esse referido traço foi usado como base comparativa para análise das amostras seguintes. A Tabela 4 apresenta as condições experimentais elaboradas para os 4 traços.

Tabela 4: Condições experimentais

Traço	Proporção areia média e fosfogesso (%)	Corpo de Prova
1	100/0	1,2,3 e 4
2	90/10	5,6,7 e 8
3	80/20	9,10,11 e 12
4	70/30	13,14,15 e 16

Observando que os traços foram corrigidos de acordo com as Tabelas 5, 6, 7 e 8, memorial de cálculo do teor de umidade, onde foram subtraídos 3,2% do teor de umidade da areia média e 25% do fosfogesso, conseqüentemente.

Tabela 5: Traço de concreto para amostra 1

Traço Convencional seco		Traço Convencional com umidade (Traço Corrigido)	
Material	Quantidade (Kg)	Material	Quantidade (Kg)
Areia	6,19	Areia	6,39
Brita 1	6,05	Brita 1	6,05
Cimento CP III 40RS	2,62	Cimento CP III 40RS	2,62
Água	1,54	Água	2,087

Tabela 6: Traço de concreto para amostra 2

Traço com 90% de Areia Média e 10% Fosfogesso		Traço com 90% de Areia Média e 10% Fosfogesso Corrigido	
Material	Quantidade (Kg)	Material	Quantidade (Kg)
Areia	5,571	Areia	5,749
Fosfogesso	0,819	Fosfogesso	0,983
Brita 1	6,05	Brita 1	6,05
Cimento CP III 40RS	2,62	Cimento CP III 40RS	2,62
Água	1,54	Água	0,543

Tabela 7: Traço de concreto para amostra 3

Traço com 80% de Areia Média e 20% Fosfogesso		Traço com 80% de Areia Média e 20% Fosfogesso Corrigido	
Material	Quantidade (Kg)	Material	Quantidade (Kg)
Areia	4,952	Areia	5,11
Fosfogesso	1,238	Fosfogesso	1,486
Brita 1	6,05	Brita 1	6,05
Cimento CP III 40RS	2,62	Cimento CP III 40RS	2,62
Água	1,54	Água	1,134

Tabela 8: Traço de concreto para amostra 4

Traço com 70% de Areia Média e 30% Fosfogesso		Traço com 70% de Areia Média e 30% Fosfogesso Corrigido	
Material	Quantidade (Kg)	Material	Quantidade (Kg)
Areia	4,33	Areia	4,472
Fosfogesso	1,857	Fosfogesso	2,21
Brita 1	6,05	Brita 1	6,05
Cimento CP III 40RS	2,62	Cimento CP III 40RS	2,62
Água	1,54	Água	0,937

Obtendo o teor de úmida das amostras, pode-se dar sequência ao traço do concreto ideal, pois de acordo com o resultado obtido, foi corrigido o traço. Onde foi feito, inicialmente, o traço com 0% de fosfogesso, ou seja, o traço convencional para comparativa.

Traço convencional de acordo com a equação (7).

$$C_c = \frac{c_a}{a/c} \quad (7)$$

Sendo:

Cc o Consumo de cimento

Ca o Consumo de água

a/c o Fator água por cimento.

Foi obtido:

- a. 1 unidade em massa de cimento
- b. 2,42 em massa de areia
- c. 2,34 em massa de brita
- d. 0,60 em massa de água que corresponde a litros.

Posteriormente, deu-se o início do cálculo para encontrar a massa em quilos de cada elemento (Tabela 9).

Tabela 9: Massa dos elementos

Massa	-	Kg
Cimento CPIII 40RS:	1,00 x 50	50
Areia:	2,42 x 50	121
Brita:	2,34 x 50	117
Água:	0,60 x 50	30

Na sequência, transformou-se o volume em litros dividindo a massa em quilos pela densidade específica de cada material (Tabela 10).

Tabela 10: Transformação do traço em quilogramas para litros

Material	Quant. (L)	Peso específico	Litros
Areia	121	2,6	46,54
Brita 1	117	2,7	43,33
Cimento CPIII40RS	50	3,12	16,03
Água	30	1	30
Volume Total			135,9

(1:2,42:2,34:0,60).

Na sequência do experimento, calculou-se o volume necessário (Tabela 12) para ocupar o cilindro do *Slump teste* de acordo com a equação (8)

$$V = \frac{1}{3} \pi h (R^2 + r^2 + Rr) \quad (8)$$

Sendo:

V o Volume

h o Altura

R o Raio maior

r o Raio menor

Tabela 11: Volume total tronco cone

Material	Litros	Volume Total	L/V	Volume Cone	Litros
Areia	46,54	135,90	0,34	5,5	1,88
Brita 1	43,33	135,90	0,32	5,5	1,75
Cimento CP III 40RS	16,03	135,90	0,12	5,5	0,65
Água	30,00	135,90	0,22	5,5	1,21
Vol. Total Cone					5,50

Para o cálculo do corpo de prova, adotou-se a equação (9) considerando as medidas normativas da NBR 5738/03 R = Raio igual a 5 centímetros e h = altura 20 centímetros.

$$V = \pi R^2 \cdot h \quad (9)$$

O volume necessário para preencher 4 corpos de prova, de acordo com cálculos, foi de 6,28 litros. Onde foi adotada uma margem para efeito de execução de 7 litros no traço.

O volume específico de cada material dividido pelo volume total, o resultado multiplicado pelo volume do cilindro, resultou na quantidade específica de cada material para totalizar o volume do corpo de prova, como ilustra a Tabela 12.

Tabela 12: Volume total cilindro

Material	Litros	Volume Total	L/V	Volume Cilindro	Litros
Areia	46,54	135,90	0,34	7	2,40
Brita 1	43,33	135,90	0,32	7	2,23
Cimento CP III 40RS	16,03	135,90	0,12	7	0,83
Água	30,00	135,90	0,22	7	1,55
Vol. Total Cilindro					7,00

A tabela 13 revela a transformação que foi feita de cada elemento, de litros para quilogramas, facilitando, dessa forma, na hora da pesagem.

Tabela 13: Transformação do traço de litros para quilograma

Material	Vol. Cone (litros)	Volume (Kg)	Vol. Cilindro (litros)	Volume (Kg)
Areia	1,88	4,89	2,4	6,23
Brita 1	1,75	4,73	2,23	6,02
Cimento CPIII40RS	0,65	2,02	0,83	2,57
Água	1,21	1,21	1,55	1,54
	Total	12,85	Total	16,36

3.5 DETERMINAÇÃO DO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (SLUMP TEST)

Todos os equipamentos e materiais utilizados no experimento pertencem à UNAERP – Campus Guarujá. A preparação para o teste foi realizada no laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Ribeirão Preto.

O quadro 6 apresenta os materiais utilizados no teste e a identificação do mesmo quanto à marca, fornecedor e/ou fabricante.

Quadro 6: Materiais utilizados para o concreto com a adição do fosfogesso

MATERIAIS	IDENTIFICAÇÃO (Marca Fornecedor Fabricante)
Cimento	CP III 40 RS
Fosfogesso	COPEBRÁS
Areia média	ESTOQUE DA UNAERP-GUARUJÁ
Brita 1	ESTOQUE DA UNAERP-GUARUJÁ
Água	Concessionária

Os componentes do ensaio (Figura 18) foram:

1. Molde tronco-cônico
2. Colarinho metálico
3. Placa metálica quadrada
4. Haste de socamento.



Figura 18: Equipamentos do *Slump Test*.

3.5.1 Coleta do Material e Preparação dos Agregados

O fosfogesso (Figura 19) foi coletado em seu estado natural de produção, fornecido pela Indústria de Fertilizante COPEBRÁS, localizada no bairro industrial de Cubatão/SP. A coleta foi realizada manualmente.

Após o recolhimento do material na indústria, o mesmo foi levado para a UNAERP-CAMPUS GUARUJÁ para compor os agregados do concreto que foram usado no teste de abatimento de concreto (*SLUMP*).



Figura 19: Fosfogesso.

O cimento utilizado foi o CP III 40 RS – Cimento Portland - resistente aos sulfatos, que é regido pela ABNT NBR 5737(Figura 20).

O mesmo foi retirado do saco manualmente e colocado em recipientes para que fosse pesado.

Após a coleta o mesmo foi utilizado para gerar o concreto.



Figura 20: Cimento Portland.

Os agregados foram fornecidos pela UNAERP-Campus Guarujá. Foram retirados manualmente e colocados num recipiente para serem pesados e usados na composição do traço de concreto. O agregado miúdo (Figura 21) foi peneirado a fim de remover impurezas e diferentes granulometrias. O agregado graúdo apresentado na (Figura 22) teve suas impurezas removidas manualmente.



Figura 21: Agregado miúdo.



Figura 22: Agregado graúdo.

A água, que compôs o concreto utilizado na pesquisa, foi fornecida pela UNAERP- Campus Guarujá, já que a mesma tem o fornecimento da água pela concessionária SABESP que garante uso adequado desse material, conforme Figura 23, segundo (Ambrozewicz, 2012).



Figura 23: Água utilizada no concreto.

3.5.2 Determinação do teste de abatimento (*Slump Test*)

3.5.2.1 Ensaio de *Slump* traço 1,2,3 e 4.

Após a preparação dos materiais, o concreto foi preparado manualmente respeitando a dosagem do traço definido (Figura 24). Posteriormente, o concreto foi inserido no tronco cone para a realização do teste, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT BR NM 67. Depois de incorporada a mistura para o teste de abatimento ou *Slump Teste*, foi colocado, cuidadosamente, um terço do concreto dentro de uma forma tronco cone adensando com 25 golpes, posteriormente dois terços também adensando com 25 golpes e por último os três terços restantes também adensados com 25 golpes, para verificar o abatimento foi retirado o molde lentamente no sentido vertical, colocado com a base voltada para cima (Figura 25) e medida a diferença entre a altura do molde e a altura da massa de concreto depois de assentada. O procedimento se repetiu para traço 1 100/0 (Figuras 24 e 25), traço 2 90/10 (Figuras 26, 27 e 28), traço 3 80/20 (Figuras 29, 30 e 31) e traço 4 70/30 (Figuras 32, 33 e 34).



Figura 24: Mistura dos materiais para traço 1.



Figura 25: *Slump Test* traço 1.



Figura 26: Traço 2 (90% areia e 10% fosfogesso).



Figura 27: Mistura dos materiais para traço 2.



Figura 28: *Slump Test* traço 2.



Figura 29: Traço 3 (80% areia e 20% fosfogesso).



Figura 30: Mistura dos materiais para traço 3.



Figura 31: *Slump Test* traço 3.



Figura 32: Traço 4 (70% areia e 30% fosfogesso).



Figura 33: Mistura dos materiais para traço 4.



Figura 34: *Slump Test* traço 4.

3.6 DETERMINAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

A segunda parte prática, deu-se início com a mistura dos elementos (brita 1, Cimento CP III 40RS, areia média e água) manualmente, respeitando as proporções estabelecidas na norma NBR 5739.

Conforme demonstrado na Figura 35, os corpos de prova foram identificados para desforma em 7 e 28 dias, para análise comparativa de resistência, cujo objetivo dos corpos de provas de 28 dias é de f_{ck} 20, isto é, a resistência característica do concreto submetido à compressão axial deve suportar de 20Mpa com um desvio padrão de 5% de acordo com as normas.

3.6.1 Ensaio de compressão traço 1, 2, 3 e 4

Para a determinação da resistência do concreto, os corpos de provas dos traços 1,2,3 e 4 foram rompidos no laboratório de controle tecnológico da empresa Falcão Bauer depois de 7 e 28 dias de cura, o traço convencional (traço 1), CP1, CP2, CP3 e CP4 foram desinformados, em seguida, os mesmos foram posicionados, cuidadosamente, na máquina de modo que seu eixo estivesse devidamente centralizado, assim, submetidos a uma determinada carga contínua, até que os corpos de prova se rompam. Deu-se o mesmo processo do traço 1 para os

subsequentes, traço 2 dos CP5, CP6, CP7 e CP8, traço 3 CP9, CP10, CP11 e CP12 e traço 4 CP13, CP14, CP15 e CP16, como ilustram as fotos de 35 até 52.



Figura 35: Corpo de prova 7 dias – traço 1.



Figura 36: Rompimento do Corpo de prova 7 dias.



Figura 37: Corpo de prova rompido 7 dias – traço 1.



Figura 38: Rompimento do Corpo de prova 7 dias – traço 2.



Figura 39: Corpo de prova rompido 7 dias – traço 2.



Figura 40: Corpo de Prova 7 dias – traço 2.



Figura 41: Rompimento do Corpo de prova 28 dias – traço 2.



Figura 42: Corpo de prova rompido 28 dias – traço 2.



Figura 43: Rompimento do Corpo de prova 7 dias – traço 3.



Figura 44: Corpo de Prova 7 dias - Traço 3.



Figura 45: Corpo de prova rompido 7 dias – traço 3.



Figura 46: Corpo de Prova 28 dias - Traço 3.



Figura 47: Corpo de prova rompido 28 dias – traço 3.



Figura 48: Rompimento do Corpo de prova 7 dias – traço 4.



Figura 49: Corpo de prova rompido 7 dias – traço 4.



Figura 50 Corpo de Prova 7 dias - traço 4.



Figura 51: Rompimento do Corpo de prova 28 dias – traço 4.



Figura 52: Corpo de prova rompido 28 dias – traço 4.

3.7 DETERMINAÇÃO DO ENSAIO DE pH

Foi realizado o ensaio de carbonatação que consiste na visualização da alteração do pH do concreto de cobrimento. Empregou-se uma solução de fenolftaleína para o ensaio. O concreto foi fraturado e aplicada a solução na amostra de concreto, após a reação química se deu uma cor roxa significando que o concreto permaneceu no meio alcalino. Visando obter um resultado mais exato foi realizada a determinação de pH através do peagômetro digital devidamente calibrado com soluções de buffer. Posteriormente foi pesado uma porção de 10 gramas massa de concreto, esmagado com um pilão, colocado num frasco de Becker com uma solução de 20 ml de água deionizada. Após misturar bem a amostra foi levada para o medidor de pH digital obtendo os valores (Figuras de 53 a 58).



Figura 53: Solução buffer.



Figura 54: Medidor digital de pH.



Figura 55: Traço 1 Com fenolftaleína.



Figura 56: Traço 2 Com fenolftaleína.



Figura 57: Traço 3 Com fenolftaleína.

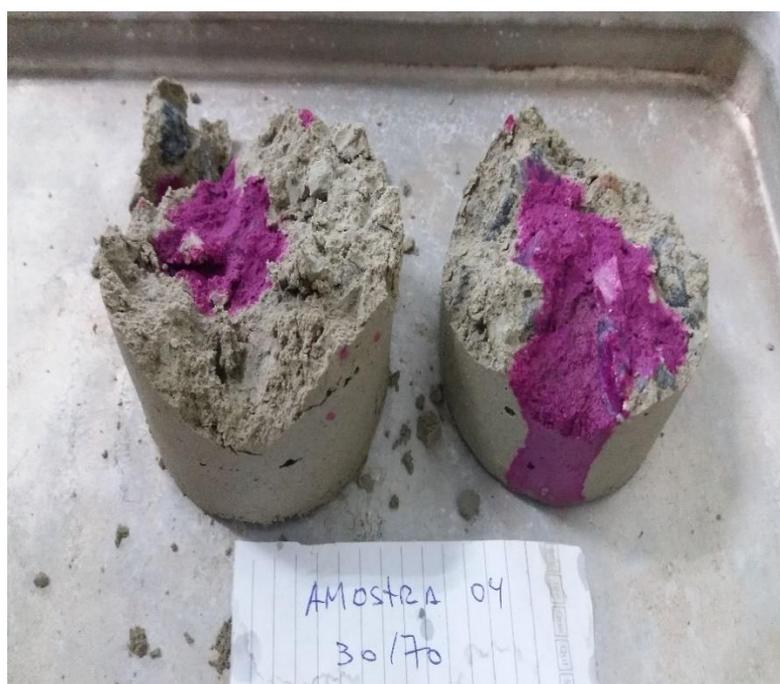


Figura 58: Traço 4 Com fenolftaleína.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO GRANULOMÉTRICO

Apresenta-se na Tabela 14 e Figura 59 o resultado do ensaio granulométrico.

Tabela 14: Distribuição do fosfogesso retido nas malhas das peneiras

Distribuição do fosfogesso retido nas malhas das peneiras							
Peneiramento		Massa retida	Retida	Fração M.R.	Retida acumulada	Fração Passante	Percentual Passante
Nº	mm	G	%		%		%
32	0,500	8,52	0,71	0,0071	0,71	0,9929	99,29
42	0,355	2,16	0,18	0,0018	0,89	0,9911	99,11
50	0,300	1,68	0,14	0,0014	1,03	0,9897	98,97
60	0,250	1,80	0,15	0,0015	1,18	0,9882	98,82
100	0,150	347,88	28,99	0,2899	30,17	0,6983	69,83
140	0,106	646,44	53,87	0,5387	84,04	0,1596	15,96
200	0,075	95,76	7,98	0,0798	92,02	0,0798	7,98
>200	0,000	95,76	7,98	0,0798	100,00	0,0000	0,00

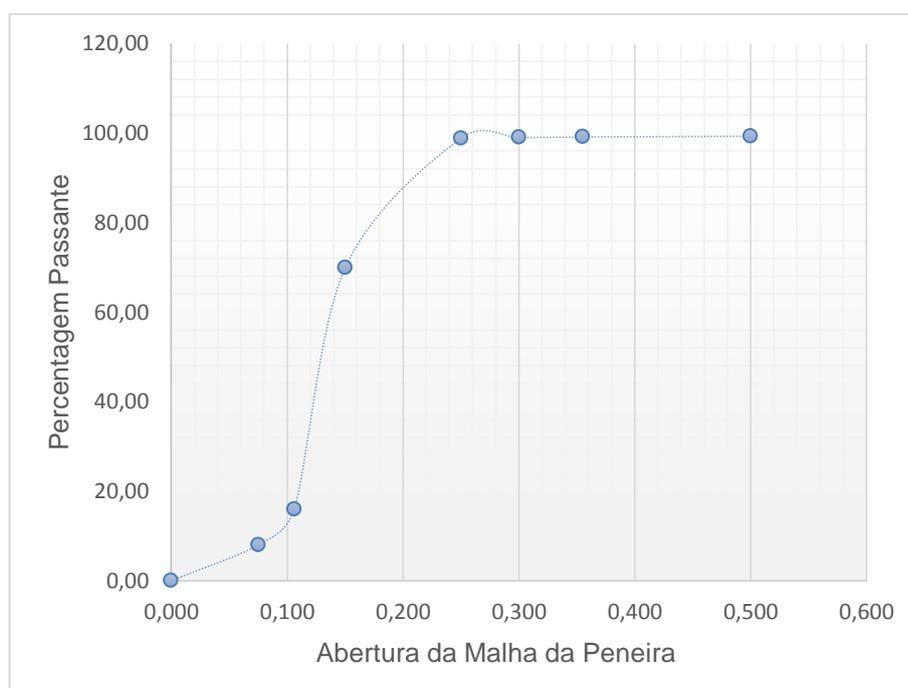


Figura 59: Curva Granulométrica.

Segundo a norma ABNT o material foi classificado como Silte.

Sendo:

Matacão - De 25 cm a 1 m

Pedra - De 7,6 cm a 25 cm

Brita - De 4,8 mm a 7,6 cm

Areia Grossa - De 1,2 mm a 4,80 mm

Areia Média - De 0,3 mm a 1,20 mm

Areia Fina - De 0,005 mm a 0,05 mm

Silte - De 0,005 mm a 0,05 mm

Argila - Inferior a 0,005 mm

4.2 DENSIDADE APARENTE DO FOSFOGESSO

Após a execução dos dois experimentos e com os resultados obtidos, foi adotada a média aritmética para densidade aparente conforme Tabela 15.

Tabela 15: Resultados do ensaio de densidade

Resultados do Ensaio de Densidade	
Amostra 1	Amostra 2
γ 1 (g/cm ³)	γ 2 (g/cm ³)
2,28	2,23
γ médio (g/cm ³) = 2,26	

4.3 TEOR DE UMIDADE DO FOSFOGESSO E AREIA MÉDIA

Os resultados do teor de umidade foram:

$$\begin{aligned} &\text{Teor de umidade do Fosfogesso} \\ H &= \frac{200,03-159,74}{159,74} \times 100 \quad H = 25,02\% \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} &\text{Teor de umidade da areia média} \\ H &= \frac{200,18-193,92}{193,92} \times 100 \quad H = 3,2\% \end{aligned} \quad (11)$$

4.4 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

Conforme Tabela 2 de relação entre trabalhabilidade e a grandeza do abatimento do concreto, os quatro traços mantiveram um abatimento verdadeiro, isto é, tiveram uma boa relação com a dosagem dos materiais utilizados na preparação do traço. Mantendo-se num intervalo de 8 a 15 centímetros. Resultados esses demonstrados na tabela 16.

Tabela 16: Resultados do ensaio de consistência "Slump Test"

Amostra	Resultado	Consistência
Traço 01	9,5	Alta
Traço 02	10,5	Alta
Traço 03	11,5	Alta
Traço 04	12,5	Alta

4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Nos resultados obtidos nos ensaios de compressão axial para os traços 1,2,3 e 4 observou-se que os corpos de provas de 7 dias do traço 1 obtiveram uma média de tensão de 13,62 MPa, sendo que os testes de corpos de provas de controle tecnológico realizados por empresas especializadas atingem uma média de 15 Mpa. O traço 2 os corpos de provas de 7 dias forneceram uma média de tensão de 11,01 Mpa sendo um rendimento de 19,17% menor que o traço 1. Para o traço 3 corpos de provas de 7 dias houve uma média de tensão de 8,08 MPa, isto é, traço 3 teve um rendimento de 40,64% menor que o traço 1. Já o traço 4 para os corpos de prova de 7 dias tiveram uma média de tensão de 7,15 MPa, um rendimento de 47,51% menor que o traço 1.

No que concerne dos resultados obtidos para 28 dias observou-se que o traço 1 aumentou em 7,75% sua resistência comparado com a resistência prevista de 20 Mpa, o traço 2 houve uma diminuição de 19,85%, o traço 3 diminuiu na ordem de

38,73% e o traço 4 reduziu sua resistência em 47,20% (Tabelas de 17 até 21) e (Figuras de 60 até 78).

Tabela 17: Resultados do ensaio de Compressão axial Traço 1

Traço	Tensão na Ruptura Corpo Prova			
	Corpo de Prova	Dias	Carga (Kg/f)	Tensão (MPa)
Convencional - traço 1	1	7	11020	13,78
Convencional - traço 1	2	7	10770	13,47
Convencional - traço 1	3	28	16970	21,22
Convencional - traço 1	4	28	17500	21,88

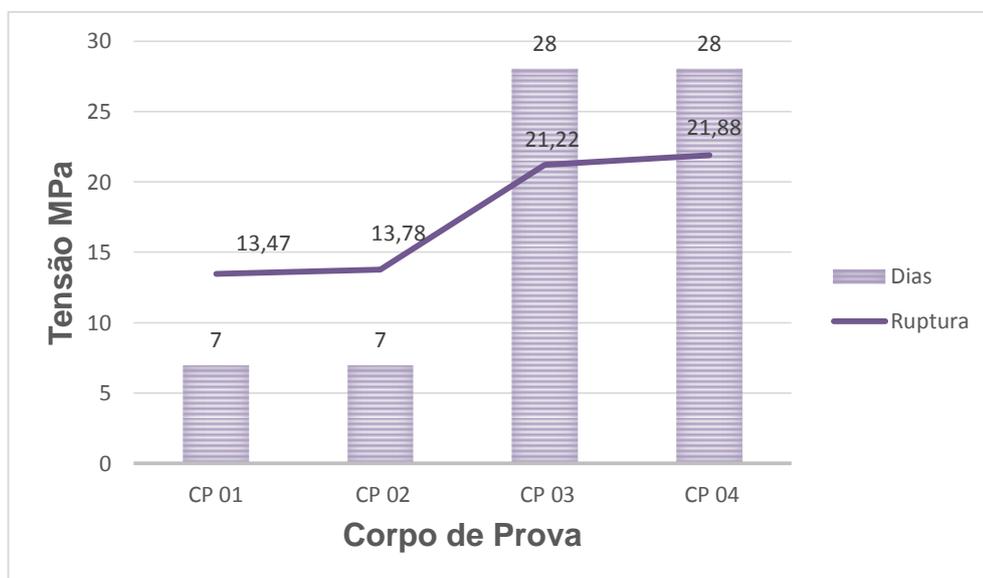


Figura 60: Ruptura Traço 1.



Figura 61: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 1 - traço 1.



Figura 62: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 2 - traço 1.

Tabela 18: Resultados do ensaio de compressão axial Traço 2

Traço	Corpo de Prova	Dias	Tensão na Ruptura Corpo Prova	
			Carga (Kg/f)	Tensão (MPa)
90% areia 10% Fosfogesso	5	7	8770	10,97
90% areia 10% Fosfogesso	6	7	8840	11,05
90% areia 10% Fosfogesso	7	28	12750	15,94
90% areia 10% Fosfogesso	8	28	12880	16,11

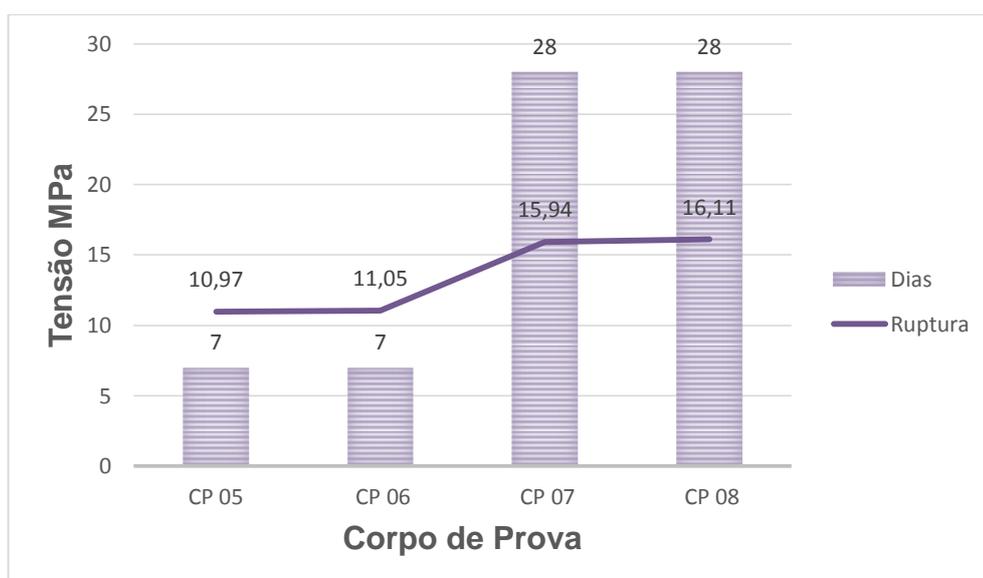
**Figura 63: Ruptura Traço 2.****Figura 64: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova - 5 traço 2.**



Figura 65: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 6 - traço 2.



Figura 66: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 7 - traço 2.



Figura 67: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 8 - traço 2.

Tabela 19: Resultados do ensaio de compressão axial Traço 3.

Traço	Corpo de Prova	Dias	Tensão na Ruptura Corpo Prova	
			Carga (Kg/f)	Tensão (MPa)
80% areia 20% Fosfogesso	9	7	6590	8,24
80% areia 20% Fosfogesso	10	7	6340	7,93
80% areia 20% Fosfogesso	11	28	9750	12,19
80% areia 20% Fosfogesso	12	28	9850	12,32

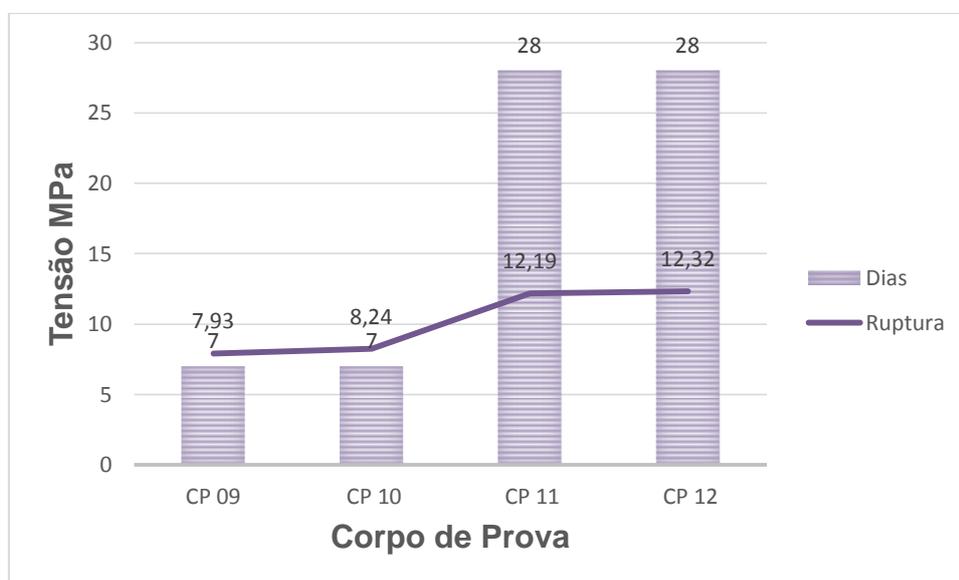


Figura 68: Ruptura Traço 3.



Figura 69: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 9 - traço 3.



Figura 70: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 10 - traço 3.



Figura 71: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 11 - traço 3.



Figura 72: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 12 - traço 3.

Tabela 20: Resultados do ensaio de compressão axial Traço 4

Traço	Corpo de Prova	Dias	Tensão na Ruptura Corpo Prova	
			Carga (Kg/f)	Tensão (MPa)
70% areia 30% Fosfogesso	13	7	5650	7,07
70% areia 30% Fosfogesso	14	7	5790	7,24
70% areia 30% Fosfogesso	15	28	8390	10,49
70% areia 30% Fosfogesso	16	28	8500	10,63

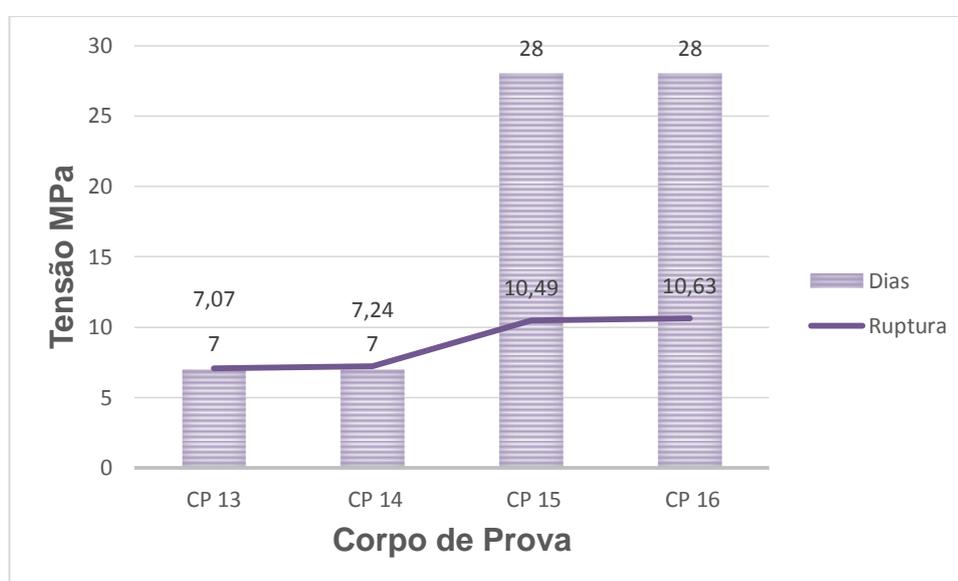


Figura 73: Ruptura traço 4.



Figura 74: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 13 - traço 4.



Figura 75: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 14 - traço 4.



Figura 76: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 15 - traço 4.



Figura 77: Carga no momento da ruptura do Corpo de prova 16 - traço 4.

Tabela 21: Propriedades apresentadas pelos corpos de prova

Resultados Obtidos através do teste de compressão axial				
Tensão na Ruptura Corpo Prova				
Traço	Corpo de Prova	Dias	Carga (Kg/f)	Tensão (MPa)
Convencional	1	7	10770	13,4
Convencional	2	7	11020	13,8
Convencional	3	28	16970	21,22
Convencional	4	28	17500	21,88
90% areia 10% Fosfogesso	5	7	8770	10,97
90% areia 10% Fosfogesso	6	7	8840	11,05
90% areia 10% Fosfogesso	7	28	12750	15,94
90% areia 10% Fosfogesso	8	28	12880	16,11
80% areia 20% Fosfogesso	9	7	6590	8,24
80% areia 20% Fosfogesso	10	7	6340	7,93
80% areia 20% Fosfogesso	11	28	9750	12,19
80% areia 20% Fosfogesso	12	28	9850	12,32
70% areia 30% Fosfogesso	13	7	5650	7,07
70% areia 30% Fosfogesso	14	7	5970	7,24
70% areia 30% Fosfogesso	15	28	8390	10,49
70% areia 30% Fosfogesso	16	28	8500	10,63

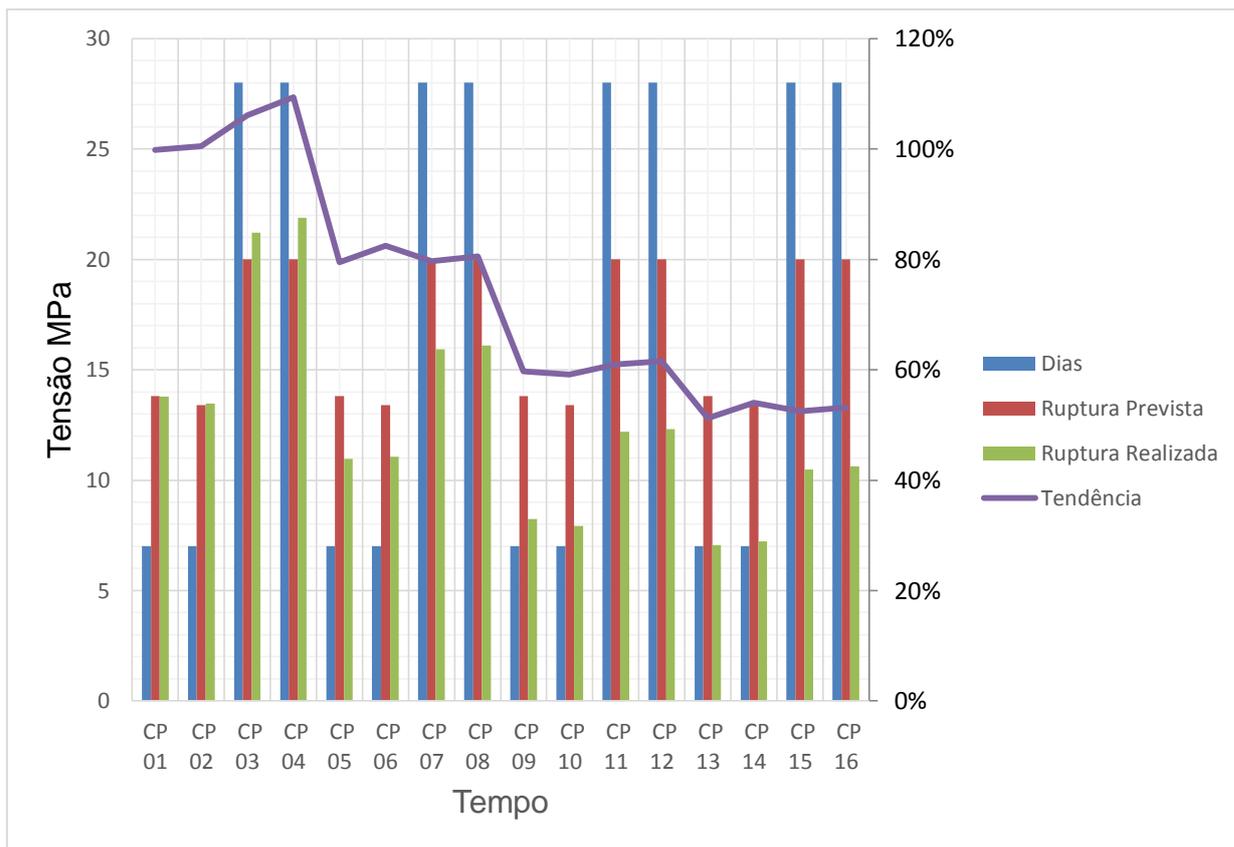


Figura 78: Ruptura prevista x realizada comparativo.

4.6 ENSAIO DE pH

Os resultados obtidos por peagômetro foram: a) traço 1 100/0 massa de 10,025 gramas, pH de 12,65; b) traço 2 90/10 massa de 10,018 gramas, pH de 12,64; c) traço 3 80/20 massa de 10,033 gramas, pH de 11,66; d) traço 4 70/30 massa de 10,002 gramas, pH de 12,75. Todas as amostras permaneceram em meio alcalino (Figuras de 79 até 82).



Figura 79: Traço 1 valor do pH.



Figura 80: Traço 2 valor do pH.



Figura 81: Traço 3 valor do pH.



Figura 82: Traço 4 valor do pH.

5 CONCLUSÃO

De acordo com a proposta do trabalho de analisar a resistência e a consistência do concreto adicionando um percentual de fosfogesso e utilizando os métodos de controle tecnológico, foi possível concluir que sua consistência manteve uma média alta com boa coesão e boa trabalhabilidade. Assim, é possível utilizar esse material para diversos fins com relação à consistência, pois o material, aparentemente, conseguirá se moldar em qualquer geometria.

Pode-se concluir também que, conforme o percentual de fosfogesso adicionado foi aumentando, gradualmente, nos traços de concreto a taxa de rendimento da tensão diminuiu consideravelmente, isto significa que o fosfogesso, como agregado miúdo, implicou diretamente na perda de resistência do concreto, assim limitando sua utilização em elementos estruturais.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Visando a continuidade do trabalho sugere-se:

- a. Avaliar a resistência do concreto ativo com fosfogesso;
- b. Caracterizar o sulfato e o cloreto do pH no concreto ativo com o fosfogesso;
- c. Analisar a aplicação do concreto com o fosfogesso na armadura de aço (concreto armado);
- d. Verificar a consistência do concreto com fosfogesso em outros traços de concreto, com dosagens diferentes;
- e. Elaborar artefatos (como blocos, placas e guias) a partir da adição de fosfogesso como agregado miúdo ou a substituição do gesso pelo fosfogesso;
- f. Realizar a análise financeira do uso do fosfogesso na construção civil.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 1004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

NBR 11578: Cimento Portland composto. São Paulo, 1991.

NBR 7680: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2015.

NBR NM 36: Concreto Fresco – Separação de agregados grandes por peneiramento. Rio de Janeiro, 1995.

NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 1994.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção: Normas, Especificações, Aplicações e Ensaio de Laboratório**. São Paulo: PINI, 2012. P. 459.

ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto**. Núcleo de ensino e pesquisa da alvenaria estrutural – NEPAE. Universidade Estadual Paulista - UNESP. Ilha Solteira SP, 2002.

CANUT, M. M. C. **Estudo de viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CARVALHO, R. C; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: Segundo a NBR 6118:2014**. 4 ed. São Carlos: Edu FSCAR, 2015.

CEKINSKI, E. **Tecnologia de Produção de Fertilizantes**. Instituto de Tecnológicos. 1990

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 26 out. 2016.

COSTA, A. C. B; BENTO, B. H; MARQUES, J. R. **Relatório: ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Slump Test (NBR NM 67/96), Moldagem e cura de corpos-de-prova (NBR5738/2003) e Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (NBR 5739/2007)**. Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos. Barretos, 2012.

CLUBE DO CONCRETO. **Um novo material de construção civil**. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/07/inovacao-um-novo-material-de-construcao.html>>. Acesso em 24 maio 2017

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral Brasileiro 2008**, Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2008.

FERRARI, F. O. S. **Utilização de fosfogesso, resíduos da produção de cal e areia da extração de ouro para produção de materiais da construção civil. 2012**. 86 f. Dissertação (Mestrado em concentração de engenharia e ciência dos materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

FREITAS, J. B de. **A disposição do fosfogesso e seus impactos ambientais**. In: Seminário sobre o uso do gesso na agricultura, 2., 1992, Uberaba. *Anais...* Uberaba: IBRAFOS, 1992.

MAZZILLI B. P. **A radioatividade do fosfogesso**. In: **Desafios tecnológicos para o reaproveitamento do fosfogesso**, 1., 2005. Belo Horizonte. Anais eletrônicos. Belo Horizonte: UFMG, 2005. Disponível em: <<http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em 22 março 2017.

MAZZILLI, B. P., V. SAUEIA, C. NISTI, M.B. **Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum**. Elsevier: Journal of Environmental Radioactivity, n. 49, p. 113-122, 2000.

MINAYO, M. C. de S. (Org.) **Pesquisa social**: teoria, método e criatividade. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. P. 84.

SANTOS, A. J. G. **Avaliação do impacto radiológico ambiental do fosfogesso brasileiro e lixiviação de ^{226}Ra e ^{210}Pb** . 2002. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

SANTOS, A. R. **Análise termo econômica do processo de transformação química do fosfogesso em torta carbonatada ou torta hidróxido**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Minas Gerais, 2001.

SAUEIA, C.H.R. **Distribuição elementar e de radionuclídeos na produção e uso de fertilizantes fosfatados no Brasil**. Tese (Doutorado) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo. 2006

SILVA, H. V. S. **Análise experimental do fosfogesso como isolante térmico através da transferência de calor por condução**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Universidade Santa Cecília. Santos/São Paulo, 2013.

SINDUGESSO, Sindicato das Indústrias e Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcários, Derivados de Gesso e de Minerais Não-metálicos do Estado de Pernambuco. **Mercado de gipsita e gesso no Brasil**. Pernambuco, 2004. Disponível em: <<http://www.sindusgesso.org.br/jornal/>>. Acesso em: 27 out. 2016.

UMISED, N.U. **Dose ionizante decorrente do uso de fertilizantes agrícolas**. Faculdade Saúde Pública. São Paulo 2007.

VILLAVERDE, L. FREDDY. **Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso**. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.