

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

ELAYNE THAÍS GRUBER

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM RESÍDUOS DE
FOSFOGESSO E CERÂMICA BRANCA EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO
PORTLAND**

JOINVILLE
2021

ELAYNE THAIS GRUBER

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM RESÍDUOS DE
FOSFOGESSO E CERÂMICA BRANCA EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO
PORTLAND**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
Orientadora: Dra. Carneane Effting

**JOINVILLE
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Gruber, Elayne Thais

Desempenho de argamassas autonivelantes com resíduos
de fosfogesso e cerâmica branca em substituição ao cimento
Portland / Elayne Thais Gruber. -- 2021.
139 p.

Orientadora: Carmeane Effting

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2021.

1. Argamassa autonivelante . 2. Contrapiso. 3.
Fosfogesso. 4. Fosfogesso calcinado. 5. Cerâmica branca. I.
Effting, Carmeane. II. Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

ELAYNE THAÍS GRUBER

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM RESÍDUOS DE
FOSFOGESSO E CERÂMICA BRANCA EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO
PORTLAND**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Carmeane Effting
CCT/UDESC (Orientadora/Presidente)

Membros:

Prof. Dr. Itamar Ribeiro Gomes
CCT/UDESC

Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin
UNESC

Joinville, 06 de setembro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edite e Werner, e à minha irmã Evelyn, por todo o amor, incentivo e compreensão em momentos de ausência. Obrigada por sempre estarem ao meu lado, tenho muita sorte em ter vocês por perto.

Ao meu namorado Paulo, agradeço a paciência, companheirismo e carinho durante todos os anos de graduação e mestrado. Obrigada por dividir a vida comigo, você torna tudo muito melhor.

À toda minha família, amigos e colegas de trabalho que me incentivaram a buscar mais esta etapa da carreira profissional.

À minha professora orientadora, Carmeane Effting, pela amizade construída, por ter acreditado no meu potencial durante esses anos e ser um grande exemplo de pessoa e profissional para mim.

À Universidade do Estado de Santa Catarina e membros do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de desenvolver minha pesquisa e aprender com grandes profissionais, especialmente ao Dr. Adilson Schackow por toda a ajuda e prestatividade durante a realização dos ensaios em laboratório.

Por fim, deixo registrado meu agradecimento a todos que de alguma forma contribuíram com a realização desta pesquisa.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos.”
(Marcel Proust)

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico vem fomentando significativas mudanças na construção civil mundial. Neste cenário de modernização, destaca-se a utilização de argamassas autonivelantes para contrapiso. No entanto, estes materiais requerem grandes quantidades de cimento para atingirem as resistências necessárias. Neste sentido, um dos desafios da sustentabilidade na construção civil é diminuir o consumo de materiais cimentícios. Para isto, buscam-se materiais alternativos que reduzam este passivo ambiental, através da incorporação de resíduos industriais em substituição ao cimento. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo estudar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas autonivelantes produzidas com os resíduos industriais de fosfogesso natural, fosfogesso calcinado a temperatura de 450 °C durante 4 horas, resultando na forma de sulfato de cálcio denominada anidrita, e cerâmica branca. Foram desenvolvidas misturas com a substituição de 50% da massa de cimento pelos resíduos e comparadas à argamassa de referência (sem resíduo). As misturas foram produzidas com cimento CP II Z-32, areia fina e aditivos superplastificante e modificador de viscosidade. No estado fresco, foram avaliadas propriedades relativas à fluidez (fluidez inicial, retenção de fluxo e tempo de regeneração), conforme a norma americana C1708, tempo de pega e calor de hidratação e, no estado endurecido, as resistências mecânicas, retração linear e aderência, com o objetivo de estudar o potencial de utilização destes materiais na camada de contrapiso. O resíduo de cerâmica branca apresentou menor liberação de calor nas idades iniciais e diminuição da retração, além de resistência mecânica superior e menor índice de vazios e absorção de água. Nas argamassas à base de sulfato de cálcio, as misturas produzidas com anidrita apresentaram resultados satisfatórios para resistência à compressão e tração na flexão e resistência de aderência à tração, sendo benéfica a calcinação do resíduo.

Palavras-chave: Argamassa autonivelante. Contrapiso. Fosfogesso. Fosfogesso calcinado. Cerâmica branca. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Technological development has been fostering significant changes in world civil construction. In this modern scenario, the use of self-levelling mortars for subfloor stands out. However, these materials require large amounts of cement to achieve the required strength. In this way, one of the challenges of sustainability in civil construction is to reduce the consumption of cementitious materials. For this, alternative materials are sought that reduce this environmental liability, through the incorporation of industrial waste to replace cement. Thus, the present work aimed to study the physical and mechanical properties of self-levelling mortars produced with industrial residues of natural phosphogypsum, phosphogypsum calcined at a temperature of 450 °C for 4 hours, resulting in the form of calcium sulfate called anhydrite, and white ceramic. Mixtures were developed with the replacement of 50% of the cement mass by residues and compared to the reference mortar (without residue). The mixtures were produced with CP II Z-32 cement, fine sand and superplasticizer and viscosity modifier additives. In the fresh state, properties related to fluidity (initial flow, flow retention and healing time) were evaluated, according to the American standard C1708, setting time and hydration heat and, in the hardened state, mechanical resistance, linear shrinkage and adhesion, with the objective of studying the potential use of these materials in the subfloor. The white ceramic residue showed less heat release at early ages and decrease in shrinkage, in addition to higher mechanical strength and lower void index and water absorption. In the mortars based on calcium sulphate, the mixtures produced with anhydrite showed satisfactory results for compressive strength and flexural tensile strength and tensile bond strength, with the residue calcining being beneficial.

Keywords: Self-leveling mortar. Subfloor. Phosphogypsum. Calcined phosphogypsum. White ceramic. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de piso e seus elementos.....	21
Figura 2 - Argamassa tradicional para contrapiso	23
Figura 3 - Argamassa autonivelante para contrapiso	23
Figura 4 – Ensaio com Cilindro Espanhol. a) Componentes do Equipamento; b) Argamassa passando no orifício do copo; c) Determinação do espalhamento através da média dos dois diâmetros.....	26
Figura 5 - Determinação visual da segregação na pasta. a) Pasta sem segregação; b) Pasta com segregação.....	26
Figura 6 - Ensaio de calorimetria em argamassas tipo farofa (1:3 e 1:6) e argamassas autonivelantes (F1, F2 e F3)	27
Figura 7 - Ensaio de resistência de aderência à tração	29
Figura 8 - Corpos de prova (a) e equipamento utilizado (b) no acompanhamento da retração linear	31
Figura 9 - Resultados de resistência à compressão das argamassas autonivelantes produzidas com substituições do cimento, em massa, por 15, 25 e 50% de porcelana (P) e cerâmica vermelha (C) aos 7 e 28 dias	32
Figura 10 - Determinação do diâmetro de espalhamento das argamassas autonivelantes utilizando o Cilindro Espanhol	32
Figura 11 - Morfologia aparente (a) e distribuição granulométrica do fosfogesso (b).....	41
Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX) do fosfogesso natural	42
Figura 13 - Concentrações de P_2O_5 (em %) no fosfogesso	43
Figura 14 - Difratometria de Raios-X (DRX) do fosfogesso natural e calcinado.....	45
Figura 15 - Ensaio DRX para o fosfogesso natural e tratado termicamente	46
Figura 16 - MEV do fosfogesso natural (a), calcinado em baixa pressão (b) e alta pressão (c)	46
Figura 17 - Análise microestrutural do fosfogesso sem tratamento.....	47
Figura 18 - Análise microestrutural do fosfogesso calcinado	48
Figura 19 - Análise microestrutural aos 28 dias de argamassas de cimento com adição de 10 (R10), 30 (R30) e 50% (R50) de fosfogesso	48
Figura 20 - Efeito do fosfogesso sem tratamento na fluidez das argamassas autonivelantes	49
Figura 21 - Consistência de argamassas produzidas com a adição de fosfogesso não tratado e calcinado	50
Figura 22 - Efeito do fosfogesso na resistência à compressão e à flexão das argamassas autonivelantes após 1 e 28 dias.....	50
Figura 23 - DRX das misturas com diferentes porcentagens de fosfogesso (0 a 45%) após 1 dia (a) e 28 dias (b).....	51
Figura 24 - Fluxograma do processo de fabricação e impactos ambientais da cerâmica branca - Louça de mesa.....	54

Figura 25 - DRX de argamassas com 30% de resíduo de cerâmica branca e argamassa sem resíduo, respectivamente, após 1 (a), 7 (b), 28 (c) e 56 (d) dias. 1) Silicato de cálcio, 2) Portlandita, 3) Silicato de cálcio hidratado, 4) Etringita, 5) Calcita e 6) Quartzo	56
Figura 26 - Quantidade de silicatos de cálcio em função do tempo de cura e da porcentagem de resíduo de cerâmica nas misturas	56
Figura 27 - Quantidade de silicatos de cálcio hidratado (CSH) em função do tempo de cura e da porcentagem de resíduo de cerâmica nas misturas	57
Figura 28 - Formação de CSH para uma argamassa sem resíduo (a) e uma argamassa com 15% de resíduo de cerâmica branca (b) após 1, 28 e 56 dias de cura.....	58
Figura 29 - Tempos de início e fim de pega de misturas com diferentes proporções de resíduo de construção e demolição.....	59
Figura 30 - Fluxograma resumido do planejamento experimental.....	65
Figura 31 – Fluxograma dos ensaios de caracterização dos materiais	66
Figura 32 – Fluxograma dos ensaios realizados nos estados fresco e endurecido ..	67
Figura 33 - Areia MF 60/70 AFS obtida da Mineradora Veiga.....	69
Figura 34 - Resíduo de fosfogesso	70
Figura 35 - Forno utilizado na calcinação do fosfogesso	71
Figura 36 - a) Resíduos de cerâmica branca obtidos da empresa Oxford Porcelanas; b) Resíduo de cerâmica após a moagem e peneiramento	72
Figura 37 - Equipamento analisador de tamanho de partículas a laser	73
Figura 38 - Picnômetro utilizado no ensaio de determinação da massa específica ..	74
Figura 39 – a) Modelo do frasco volumétrico de Le Chatelier; b) Frasco preenchido com o material.....	75
Figura 40 - Corpos de prova para determinação da atividade pozolânica	76
Figura 41 - Frações de areia utilizadas no ensaio de atividade pozolânica	77
Figura 42 - Microscópio Eletrônico de Varredura	78
Figura 43 - Misturador mecânico utilizado no preparo das argamassas autonivelantes	80
Figura 44 - Ensaio de fluidez inicial.....	82
Figura 45 – Cortes na argamassa para o ensaio de tempo de regeneração	83
Figura 46 - Equipamentos utilizados no ensaio de determinação do tempo de pega	84
Figura 47 - Representação esquemática da curva do calor de hidratação	85
Figura 48 - Ensaio de resistência à tração na flexão.....	87
Figura 49 - Molde utilizado nos ensaios de retração	88
Figura 50 - Corpos de prova do ensaio de retração linear	88
Figura 51 - Equipamento utilizado no ensaio de retração linear.....	89
Figura 52 - Corpos de prova imersos em água	90
Figura 53 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento sem chapisco.....	92
Figura 54 - Etapas do ensaio de resistência de aderência à tração: a) Moldagem da argamassa no substrato de base cimentícia; b) Corte para fixação das pastilhas; c) Colagem das pastilhas com cola à base de resina epóxi de alta aderência; d)	

Determinação da resistência de aderência à tração; e) Corpos de prova extraídos da amostra.	93
Figura 55 - Distribuição granulométrica do fosfogesso	97
Figura 56 - Distribuição granulométrica da cerâmica branca	97
Figura 57 - Morfologia dos grãos de fosfogesso com aumento de 500x (a) e 1000x (b)	100
Figura 58 - Morfologia dos grãos de cerâmica branca com aumento de 500x (a) e 3500x (b)	101
Figura 59 - Ensaio de espalhamento da argamassa com resíduo de cerâmica branca com diâmetro médio de 125 mm	106
Figura 60 - Ensaio de tempo de regeneração	107
Figura 61 - Tempos de início e fim de pega das argamassas	108
Figura 62 - Calor de hidratação gerado pelas argamassas.....	110
Figura 63 - Resultados da resistência à compressão com 1, 7 e 28 dias	112
Figura 64 - Resultados da resistência à tração na flexão com 3 e 28 dias	115
Figura 65 - Gráfico de retração linear.....	118
Figura 66 - Gráficos dos resultados de absorção de água a) e índice de vazios b)	121
Figura 67 - Formas de ruptura identificadas conforme a NBR 13528 (ABNT, 2019: a) Ruptura na interface substrato/argamassa e b) Ruptura na argamassa	122
Figura 68 - MEV argamassa a) AR, b) CB, c) FN e d) FC com ampliações de 200x	123
Figura 69 - MEV argamassa a) AR, b) CB, c) FN e d) FC com ampliações de 2000x	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de ensaios de FRX do fosfogesso natural e calcinado.....	43
Tabela 2 - Resultados de ensaios de FRX da cerâmica branca.....	55
Tabela 3 - Dosagens de argamassas autonivelantes elaboradas por alguns autores	60
Tabela 4 - Limites de resistência de aderência à tração de revestimentos de paredes e teto	63
Tabela 5 – Dosagem de argamassas elaboradas	66
Tabela 6 - Composição química do cimento CP II Z-32	68
Tabela 7 - Caracterização do agregado miúdo	95
Tabela 8 - Ensaio de granulometria da areia.....	96
Tabela 9 - Resistência à compressão das argamassas avaliadas	98
Tabela 10 - Análise química por FRX do fosfogesso natural e calcinado	99
Tabela 11 - Análise química por FRX da cerâmica branca	99
Tabela 12 - Dosagem de argamassas com fosfogesso natural.....	102
Tabela 13 - Dosagem de argamassas com fosfogesso calcinado	103
Tabela 14 - Dosagem de argamassas com cerâmica branca	103
Tabela 15 - Tabela com resumo das argamassas estudadas	104
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de fluidez	105
Tabela 17 - Tempo de pega das argamassas avaliadas.....	107
Tabela 18 - Resultados de resistência à compressão das argamassas estudadas	111
Tabela 19 - Análise de variância da resistência à compressão.....	113
Tabela 20 - Teste de Tukey para resistência à compressão	114
Tabela 21 - Resultados de resistência à tração na flexão das argamassas estudadas	115
Tabela 22 – Análise de variância da resistência à tração na flexão	116
Tabela 23 – Teste de Tukey para resistência à tração na flexão	117
Tabela 24 – Resultados do ensaio de retração linear	118
Tabela 25 - Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica	120
Tabela 26 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração	121
Tabela 27 - Tabela de preços de acordo com o SINAPI	125
Tabela 28 - Custo por m ² das argamassas estudadas.....	125

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	graus Celsius
ρ	massa específica
MPa	mega Pascal
N	Newton
CO ₂	dióxido de carbono
C ₃ S	silicato tricálcico
C ₂ S	silicato dicálcico
C ₃ A	aluminato tricálcico
C ₄ AF	ferroaluminato de cálcio
CaO	óxido de cálcio
SO ₃	trióxido de enxofre
SiO ₂	dióxido de silício
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
Fe ₂ O ₃	óxido de ferro
CaSO ₄	sulfato de cálcio
H ₂ O	água
P ₂ O ₅	pentóxido de fósforo
OH-	hidroxila
H ₃ PO ₄	ácido fosfórico
H ₂ SO ₄	ácido sulfúrico
CaSO ₄ .2H ₂ O	sulfato de cálcio di-hidratado ou gipsita
MgO	óxido de magnésio
TiO ₂	dióxido de titânio
Na ₂ O	óxido de sódio
K ₂ O	óxido de potássio
μ m	micrometro
α	nível de significância
CSH	silicato de cálcio hidratado
CH	hidróxido de cálcio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos.....	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1	SISTEMA DE PISO E CONTRAPISO	21
2.2	ARGAMASSA AUTONIVELANTE PARA CONTRAPISO.....	22
2.2.1	Estudos desenvolvidos com argamassas autonivelantes	25
2.2.2	Vantagens e desvantagens da utilização da argamassa autonivelante	33
2.3	UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS	34
2.4	MATERIAIS	34
2.4.1	Cimento	34
2.4.2	Agregados.....	36
2.4.3	Adições minerais.....	37
2.4.4	Aditivos químicos.....	38
2.4.4.1	Aditivo superplastificante	39
2.4.4.2	Aditivo modificador de viscosidade	40
2.4.5	Resíduo de fosfogesso	40
2.4.6	Resíduo de cerâmica branca.....	52
2.5	FORMULAÇÃO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES	59
2.6	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	61
2.6.1	Propriedades no estado fresco	61
2.6.1.1	Trabalhabilidade	61
2.6.1.2	Segregação e exsudação.....	62
2.6.1.3	Retenção de água	62
2.6.2	Propriedades no estado endurecido	62
2.6.2.1	Resistência mecânica.....	62
2.6.2.2	Aderência	63
2.6.2.3	Retração	63
3	METODOLOGIA	65

3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	68
3.1.1	Cimento	68
3.1.2	Agregado miúdo	68
3.1.3	Água	69
3.1.4	Aditivos	69
3.1.5	Resíduo de fosfogesso	70
3.1.6	Resíduo de cerâmica branca	71
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	72
3.2.1	Granulometria da areia	72
3.2.2	Granulometria do fosfogesso e da cerâmica branca	73
3.2.3	Determinação da massa específica e massa unitária da areia	74
3.2.4	Determinação da massa específica dos resíduos de fosfogesso e cerâmica branca	75
3.2.5	Determinação do índice de atividade pozolânica	76
3.2.6	Análise da fluorescência de raios X - FRX	78
3.2.7	Análise microestrutural - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) ...	78
3.3	PREPARO DAS ARGAMASSAS	79
3.4	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	80
3.4.1	Fluidez inicial	81
3.4.2	Retenção de fluxo	82
3.4.3	Tempo de regeneração	83
3.4.4	Determinação do tempo de pega	84
3.4.5	Calor de hidratação	85
3.5	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	85
3.5.1	Resistência à compressão	86
3.5.2	Resistência à tração na flexão	86
3.5.3	Retração linear	87
3.5.4	Massa específica, índice de vazios e absorção de água	90
3.5.5	Resistência de aderência à tração	91
3.5.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	94
3.5.7	Análise estatística dos dados	94
3.5.8	Análise de custo e viabilidade	94
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	95

4.1.1	Caracterização da areia	95
4.1.2	Caracterização dos resíduos.....	96
4.2	DOSAGEM DAS ARGAMASSAS.....	101
4.3	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	105
4.3.1	Fluidez inicial, retenção de fluxo e tempo de regeneração	105
4.3.2	Tempo de pega	107
4.3.3	Calor de hidratação	109
4.4	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	110
4.4.1	Resistência à compressão	110
4.4.2	Resistência à tração na flexão	114
4.4.3	Retração linear	117
4.4.4	Massa específica, índice de vazios e absorção de água	120
4.4.5	Resistência de aderência à tração	121
4.4.6	Análise microestrutural	122
4.4.7	Análise de custo e viabilidade	124
5	CONCLUSÕES	126
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico e a modernização da construção civil aliados à necessidade de otimização dos processos de execução das edificações, através da redução do tempo e custos com mão de obra, destaca-se a utilização de argamassas autonivelantes para contrapiso.

Argamassas autonivelantes são materiais capazes de preencher os espaços e se consolidar através da gravidade, sem a necessidade de energia de compactação, devido à elevada fluidez. Trata-se de uma argamassa com propriedades específicas, nos estados fresco e endurecido, que possui inúmeros campos de aplicação, entre eles escolas, hospitais, indústrias, estacionamentos, escritórios e apartamentos (ONISHI; BIER, 2010).

Para Silva (2016), trata-se de uma alternativa ao método tradicional de execução do contrapiso. Porém, para que tenha fácil aplicação em tempo reduzido, é necessário que o material apresente algumas propriedades específicas, como trabalhabilidade, consistência e baixa retração. Carvalho (2015) complementa que estas propriedades são alcançadas através da otimização das dosagens, com a adequada proporção de aglomerantes, agregados finos, adições minerais e aditivos químicos, obtendo um material fluído e capaz de se autonivelar sem que ocorra exsudação e segregação.

No entanto, assim como outros materiais cimentícios, requerem grandes quantidades de cimento para atingirem as resistências necessárias. Neste sentido, um dos desafios da sustentabilidade na construção civil é diminuir o consumo de cimento devido à elevada quantidade de dióxido de carbono (CO_2) liberado na atmosfera durante o seu processo de manufatura. Para isto, buscam-se materiais alternativos que reduzam este impacto ambiental (PEREIRA e CAMARINI, 2018), visando, também, melhor desempenho e redução dos custos (TURK, 2012). Desta forma, vários estudos são desenvolvidos utilizando subprodutos industriais e agrícolas, a fim de evitar os prejuízos causados ao meio ambiente devido à deposição incorreta destes materiais (METHA; MONTEIRO, 2014).

Dentre os subprodutos oriundos das indústrias, pode-se citar o fosfogesso e a cerâmica branca. O fosfogesso é um subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados (RASHAD, 2017). O acúmulo do resíduo oriundo destas indústrias ocupa consideráveis porções de terra e resulta em sérios problemas ambientais (YANG; ZHANG; YAN, 2016).

Além disso, o Brasil possui aproximadamente 500 empresas produtoras de cerâmica branca, concentradas principalmente nas regiões Sul e Sudeste do país. Os principais desafios ambientais enfrentados por estas empresas são: elevado consumo de água e perdas de material no decorrer do processo produtivo (RUIZ *et al.*, 2011).

Sendo assim, este trabalho pretende avaliar argamassas produzidas com substituições de cimento, em massa, pelos resíduos de fosfogesso e cerâmica branca, determinando suas propriedades físicas e mecânicas, a fim de estudar a possibilidade de utilização deste material como camada de contrapiso autonivelante.

1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização da argamassa autonivelante ainda é pouco difundida no Brasil, devido ao elevado custo e a carência em conhecimento tecnológico para sua produção (PEREIRA e CAMARINI, 2018; HAMOY, 2017). Buscando prevenir as patologias decorrentes de informações limitadas sobre estes materiais, a associação norte-americana de ensaios e materiais (ASTM) publicou a norma C1708 (ASTM, 2019), que trata dos métodos de teste para argamassas autonivelantes para contrapiso, com a primeira versão elaborada em 2011.

No Brasil, a recente publicação da norma NBR 16765 (ABNT, 2019), que trata dos métodos de ensaio para contrapiso autonivelante de gesso, foi um reconhecimento da tendência de crescimento na utilização de argamassas autonivelantes no país, tendo em vista a possibilidade de otimização do processo de execução do contrapiso. Por ser a primeira norma brasileira de contrapiso autonivelante, é de grande importância na construção civil, pois busca auxiliar engenheiros e empresas nos ensaios de avaliação das argamassas. No entanto, como a norma é relativa aos métodos de ensaio, ainda há escassez de informações técnicas referentes a materiais, dosagem, lançamento, procedimento executivo e controle.

Somando-se à necessidade de modernização da construção civil, são estudadas alternativas que reduzam os impactos causados por este setor no meio ambiente. Como a crescente geração de resíduos tem levado a sociedade a buscar soluções que considerem a reciclagem, reutilização e tratamento destes, o uso de substituições ao cimento é uma alternativa de conservação e racionalização de recursos minerais e energéticos (BATTAGIN, 2011). Assim sendo, o uso de resíduos como adições em

produtos cimentícios ou como substitutos parciais do cimento, além de reduzir o impacto ambiental causados pelos rejeitos de outras indústrias, também diminuem o volume de extração de matérias-primas pelas indústrias da construção civil, preservando os recursos naturais limitados (MOLIN, 2011).

Com o crescimento contínuo da população e consequente aumento na produção de alimentos e fertilizantes, nota-se um acréscimo considerável nos depósitos de fosfogesso (RASHAD, 2017). A fim de minimizar os impactos ambientais da deposição incorreta deste material, buscam-se formas de reaproveitá-lo (HUA *et al.*, 2016). Diferentes destinações são estudadas nos últimos anos, entre elas na agricultura, construção civil, meio ambiente e energia (CÁNOVAS *et al.*, 2018).

A utilização deste resíduo pode contribuir significativamente no comportamento de argamassas autonivelantes, pois de acordo com Schaefer (2013), as argamassas autonivelantes compostas por este material apresentam como vantagens menores problemas com fissuração e boa resistência mecânica.

Além do fosfogesso, o resíduo da cerâmica branca também é proveniente da indústria. O Brasil é responsável pela produção de mais de 200 milhões de peças de cerâmica por ano, o equivalente a 2% da produção mundial. Em média, estas empresas possuem índices de 20% de perdas de matéria-prima (RUIZ *et al.*, 2011). A gestão destes resíduos industriais é difícil, pois trata-se de um material considerado não biodegradável, com período de biodegradação de até quatro mil anos (HALICKA; OGRODNIK; ZEGARDLO, 2013).

Os resíduos de cerâmica branca podem contribuir com o desempenho de argamassas autonivelantes, pois estes são constituídos predominantemente por silício e alumínio, conferindo melhorias no índice de atividade pozolânica (JOHN; CINCOTTO; SILVA, 2003), resultando em melhores propriedades mecânicas, redução do calor de hidratação e menores tempos de início e fim de pega (JUAN *et al.*, 2010).

Desta forma, considerando o crescente uso de recursos naturais para a produção de compósitos cimentícios e a possibilidade de promover o desenvolvimento de um produto com propriedades específicas para a construção civil através da utilização de rejeitos industriais, busca-se contribuir com o estudo de argamassas autonivelantes com a utilização dos resíduos de fosfogesso e cerâmica branca.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas autonivelantes para contrapiso, substituindo parcialmente o cimento Portland por resíduos de fosfogesso natural e calcinado e cerâmica branca.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, pode-se relacionar:

- Otimização das dosagens de argamassas autonivelantes com resíduos, proporcionando fluidez para se autonivelar sem que ocorra exsudação e segregação;
- Estudar o potencial de utilização dos resíduos de fosfogesso (natural e calcinado) e de cerâmica branca em argamassas autonivelantes como material pozolânico;
- Verificar como a utilização dos resíduos afetam as propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido;
- Avaliar a resistência de adesão ao substrato das argamassas produzidas;
- Verificar o calor de hidratação e a retração linear das misturas elaboradas.

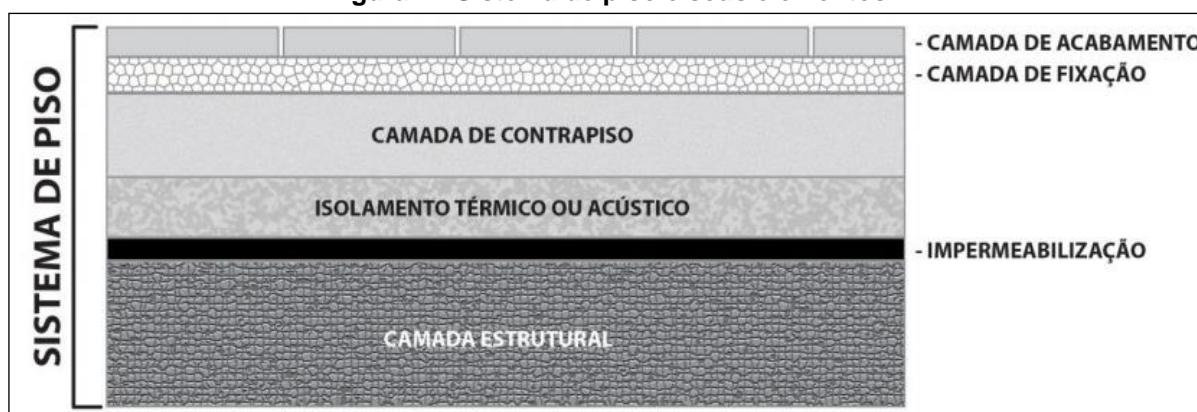
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta um resumo dos conceitos importantes relacionados às argamassas autonivelantes para contrapiso e aos resíduos utilizados. O capítulo está dividido em três seções principais, sendo a primeira sobre argamassas autonivelantes e suas definições, propriedades, materiais constituintes e aplicações, a segunda sobre os resíduos utilizados no trabalho e, por fim, uma seção abrangendo a dosagem e propriedades físicas e mecânicas destas argamassas.

2.1 SISTEMA DE PISO E CONTRAPISO

A norma de desempenho NBR 15575-3 (ABNT, 2013) define contrapiso como a camada responsável pela regularização do substrato, aderida ou não à camada de acabamento, que fornece uma superfície homogênea de apoio, podendo servir como camada de embutimento, caimento ou declividade. A Figura 1 demonstra o sistema de piso e os elementos componentes.

Figura 1 - Sistema de piso e seus elementos



Fonte: Adaptado da NBR 15575-3 (ABNT, 2013)

Souza (2013) complementa que o contrapiso é a camada componente do subsistema piso inserida logo acima da laje, possuindo ou não aderência entre eles, sobre a qual poderá ser utilizado o acabamento em madeira, cerâmica, laminado ou outros. Esta camada possui a função de nivelar e absorver as deformações, melhorar a acústica e embutir instalações. Além disso, segundo Barros (1991), pode desempenhar também as funções de barreira impermeável, isolamento térmico e criação de desníveis em ambientes.

Devido a fatores construtivos e necessidades de cada edificação e região, não há na literatura um consenso a respeito da definição e espessura da camada de contrapiso, que pode variar entre 2 e 6 centímetros (SOUZA, 2013). Observa-se que na execução das edificações, o contrapiso é tratado como uma atividade secundária, e não como um projeto específico, desconsiderando variáveis que influenciam no produto, como: função, tipo de revestimento, materiais e mão de obra disponíveis, a base sobre a qual será aplicada e solicitações de uso (BARROS, 1991).

Fiorito (2009) explica que pode existir um nivelamento da superfície anterior ao contrapiso, feito com uma camada de enchimento ou regularização. O autor considera que, independentemente da função, as camadas de argamassa não devem ser superiores a 25 milímetros, denominando de contrapiso a camada com até 25 milímetros necessária para atingir o nível ideal.

A NBR 13753 (ABNT, 1996) cita algumas prescrições para a camada de contrapiso, porém considerando a futura aplicação de outros revestimentos cerâmicos e com a utilização de argamassa colante. Entre as recomendações propostas, tem-se que o contrapiso deve ser executado diretamente sobre a base limpa, sete dias após a conclusão da camada inferior, ser constituído por uma camada de cimento e areia média úmida e possuir espessura entre 15 e 25 milímetros.

A definição da argamassa a ser utilizada na camada de contrapiso, no entanto, deve considerar o conhecimento dos tipos disponíveis e suas características, além da disponibilidade de materiais e mão de obra. As argamassas para contrapiso são classificadas em argamassa plástica, argamassa seca e argamassa fluída (BARROS, 1991).

2.2 ARGAMASSA AUTONIVELANTE PARA CONTRAPISO

No sistema de contrapiso convencional aplica-se um tipo de argamassa denominada de “farofa”, que apresenta consistência seca, é dosada em obra e possui aplicação manual (RUBIN, 2015), conforme ilustrado na Figura 2. O sistema tradicional, porém, apresenta algumas desvantagens, como: elevada espessura, acarretando o aumento do peso próprio da edificação, alto índice de patologias e baixa produtividade (NAKAKURA; BUCHER, 1997).

As argamassas tradicionais para contrapiso são produzidas com cimento, areia e água. Para serem capazes de se autonivelar, necessitam de aditivos químicos, a fim

de proporcionar a fluidez requerida (SCHAEFER, 2013). O contrapiso executado com a argamassa fluída é conhecido como contrapiso autonivelante (SOUZA, 2013), como mostrado na Figura 3.

Figura 2 - Argamassa tradicional para contrapiso



Fonte: Técnica (2013)

Figura 3 - Argamassa autonivelante para contrapiso



Fonte: Técnica (2012)

Argamassas autonivelantes à base de cimento são materiais obtidos através da mistura de materiais cimentícios, agregados, adições minerais e aditivos químicos, que se apresentam como um tipo especial de argamassa por possuírem características específicas e capacidade de se espalhar em superfícies horizontais apenas sob o efeito da gravidade e de sua própria capacidade de fluxo, formando uma superfície lisa e regular. A porcentagem de cimento Portland presente nestas argamassas varia entre 25 e 40% da massa total, a de areia fina quartzosa que varia entre 40 e 60% da massa total e a de aditivos é cerca de 10 a 15% da massa total (ZHANG *et al.*, 2018; NAKAKURA e BUCHER, 1997; MARTINS, 2009).

Trata-se de uma argamassa formada por agregado miúdo e pasta cimentícia, ou seja, uma composição na qual as partículas se distribuem uniformemente através do meio líquido (PINHO, 2015). O desnível aceitado para este tipo de argamassa é de 1 mm para cada 4 metros da superfície horizontal aplicada (MARTINS, 2009). Estes materiais são aplicados em diferentes tipos de substrato, sendo utilizados para renovação destes em edifícios antigos ou para criar superfícies planas e lisas em edificações novas, geralmente apresentando camadas finas, entre 1 e 20 milímetros (LI *et al.*, 2018).

O uso de argamassas autonivelantes é tratado como uma contribuição valiosa para a construção civil, devido à capacidade de se autonivelar, de cobrir toda a superfície, reduzir o tempo de trabalho e permitir uma aplicação rápida. Entretanto, a produção deste material requer um controle mais rigoroso (CANBAZ; TOPÇU; ATESIN, 2016).

Quando utilizadas, devem apresentar excelente fluidez, capacidade de bombeamento e de autonivelamento, bem como propriedades relacionadas à viscosidade, coesão, rápido endurecimento e ganho de resistência, durabilidade e resistência de adesão ao substrato. Estas propriedades são obtidas através da otimização das dosagens, conferindo-lhes reologia adequada para que apresentem fluidez suficiente para o autonivelamento e controle da segregação, exsudação e retração. Para atingir tais características, é usual o emprego de aditivos químicos e adições minerais (ZHANG *et al.*, 2018; MARTINS, 2009; SEIFERT; NEUBAUER; GOETZ-NEUNHOEFFER, 2012).

A fluidez necessária é alcançada com a utilização de aditivos superplastificantes e o controle da segregação é feito através de adições minerais, baixa relação água/aglomerante e, em algumas situações, aditivo modificador de viscosidade. O uso adequado de adições minerais nas misturas é importante na otimização de algumas propriedades, pois melhora a resistência e durabilidade dos materiais, através do controle do teor de água e cimento, retração, calor de hidratação, adensamento e microestrutura (RIZWAN; BIER, 2011).

O processo de aplicação das argamassas autonivelantes consiste em lançar o material sobre a superfície, respeitando os níveis controlados por tripés a laser, e ao final retirar as bolhas de ar incorporadas durante o lançamento do material, através de um rodo ou uma haste de metal (SILVA, 2016). Em alguns casos, faz-se uso de

proteções periféricas, através de espumas de 3 a 8 mm, junto aos elementos verticais, para absorver tensões e possíveis dilatações (SCHAEFER, 2013).

A NBR 15823 (ABNT, 2017) é a norma brasileira de concreto autoadensável. Esta norma é dividida em seis partes e trata da classificação e controle do concreto no estado fresco, métodos de determinação do espalhamento, tempo de escoamento, além da determinação da viscosidade e resistência à segregação. Estas propriedades também devem ser mensuradas em argamassas autonivelantes, por isso, em 2019, foi publicada a norma brasileira que trata do contrapiso autonivelante de gesso, NBR 16765 (ABNT, 2019).

A NBR 16765 (ABNT, 2019) apresenta métodos de ensaio para determinação da massa unitária, tempo de pega, índice de espalhamento, densidade de massa, resistência à tração na flexão e à compressão e dureza superficial de contrapiso autonivelante de gesso em pó.

A norma norte-americana que traz os métodos de ensaios para argamassas autonivelantes para contrapiso é a C1708 (ASTM, 2019), que estabelece os ensaios para avaliar a fluidez (fluidez inicial, retenção de fluxo e tempo de regeneração), resistência à compressão e à tração na flexão, retração, tempo de pega, resistência à abrasão e viscosidade, além de métodos para mistura mecânica das argamassas.

2.2.1 Estudos desenvolvidos com argamassas autonivelantes

Martins (2009) avaliou os procedimentos para a formulação de pastas para argamassas autonivelantes utilizando Cimento CP V-ARI, adição de sílica ativa (substituição de 5 a 8% da massa de cimento), que é um resíduo industrial com elevado grau de finura, aditivo superplastificante (0,5 a 1,0% da massa de cimento) e aditivo modificador de viscosidade (0,2 a 1,1% da massa de cimento), por meio de ensaios laboratoriais no estado fresco. Além disso, a autora também avaliou a eficiência do equipamento Cilindro Espanhol para determinar a fluidez das misturas, conforme ilustrado na Figura 4.

As variáveis independentes adotadas foram relação água/materiais secos e os percentuais de aditivo modificador de viscosidade e de aditivo superplastificante, e as variáveis resposta tempo de escoamento, diâmetro do espalhamento e análise visual de segregação e exsudação.

Figura 4 – Ensaio com Cilindro Espanhol. a) Componentes do Equipamento; b) Argamassa passando no orifício do copo; c) Determinação do espalhamento através da média dos dois diâmetros.



Fonte: Martins (2009)

A análise visual de segregação foi feita com base na espessura da pasta escoada, classificando em argamassa sem segregação as misturas coesas e com bordas altas e lisas, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Determinação visual da segregação na pasta. a) Pasta sem segregação; b) Pasta com segregação.



Fonte: Martins (2009)

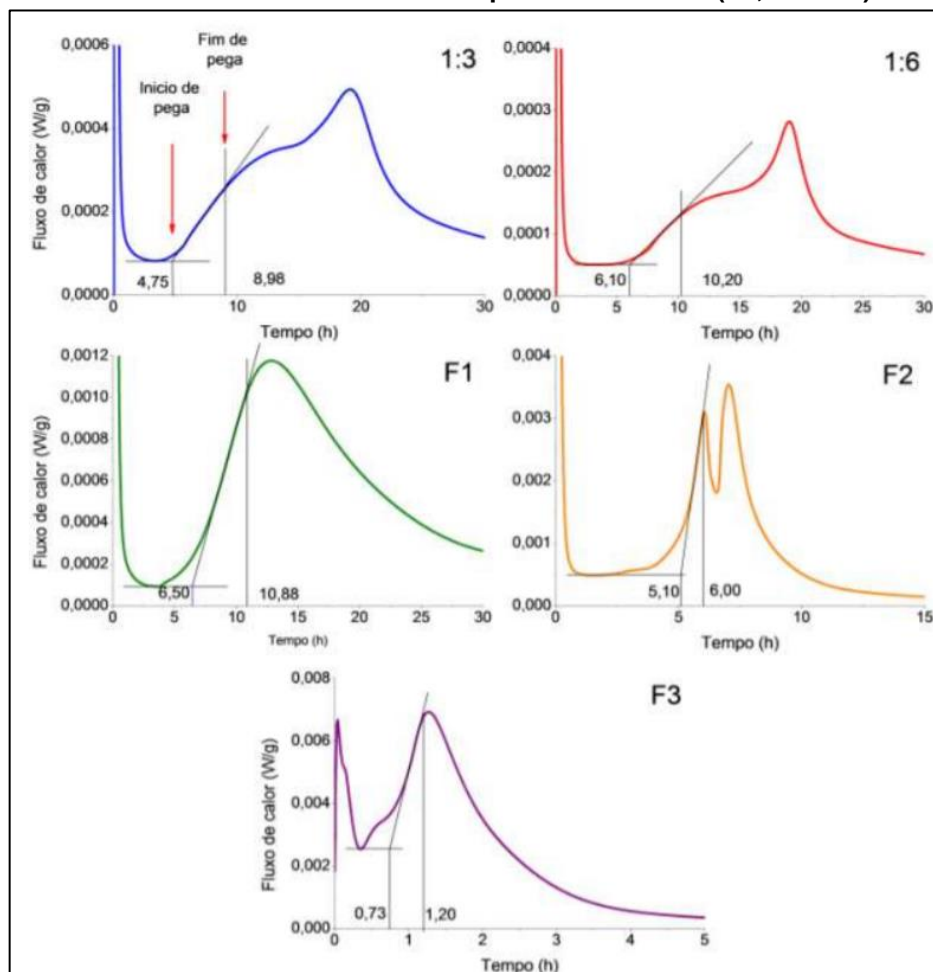
Os diâmetros médios de espalhamento adotados por Martins (2009) variam entre 25 e 30 cm, conforme dados obtidos de ensaios com o cilindro espanhol. Os resultados demonstraram que o diâmetro de espalhamento da pasta diminuiu com o acréscimo da sílica, independente da relação água/materiais secos e teores de aditivo modificador de viscosidade, pois trata-se de um material com área específica menor que a dos demais elementos constituintes, preenchendo os espaços com maior facilidade. Além disso, a autora observou que o aditivo modificador de viscosidade foi o que mais influenciou na segregação e no tipo de borda das misturas, obtendo melhores resultados com teores de 0,9% de aditivo.

Rubin (2015) efetuou um comparativo entre argamassas autonivelantes para contrapiso industrializadas e argamassas dosadas em obra, na cidade de Porto

Alegre/RS. Foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas de dois traços de argamassas tipo farofa dosadas em obra (1:3 e 1:6, respectivamente cimento e areia, em volume) e três formulações industrializadas de argamassas autonivelantes prontas comercializadas no Brasil, denominadas F1, F2 e F3, produzidas conforme as recomendações dos fabricantes. As misturas foram produzidas com cimento CP IV (cimento Portland pozolânico), por ser o mais encontrado na região do estudo, e areia quartzosa natural com módulo de finura de 2,25 e dimensão máxima dos grãos igual a 4,75 mm.

Os tempos de início e fim de pega das misturas foram determinados através do ensaio do calorímetro, conforme mostrado na Figura 6. Ademais, Rubin (2015) concluiu que argamassas com maiores teores de finos (cerca de 62%), granulometria contínua e partículas com maior área superficial resultam em menores tempos de início e fim de pega, acelerando o processo de hidratação.

Figura 6 - Ensaio de calorimetria em argamassas tipo farofa (1:3 e 1:6) e argamassas autonivelantes comercializadas prontas no Brasil (F1, F2 e F3)



Fonte: Rubin (2015)

Dentre todas as argamassas avaliadas, a argamassa produzida em obra com o traço 1:3 (cimento : areia, em volume de areia úmida) foi a que apresentou melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão e à tração e de aderência. Os valores de resistência à compressão aos 28 dias das três argamassas autonivelantes variaram entre 10,04 e 17,72 MPa, enquanto os de tração resultaram em valores entre 1,25 e 2,10 MPa e resistência de aderência à tração entre 1,34 e 2,81 MPa.

Silva (2016) desenvolveu formulações de argamassas autonivelantes para contrapiso com a incorporação de fibras sintéticas e substituições parciais do cimento por cinza volante, com o objetivo de avaliar a influência destas no processo de retração por secagem das misturas. Utilizou cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI), cinza volante com dimensão dos grãos entre 0,1 e 100 μm , areia natural com módulo de finura de 2,4 e diâmetro máximo dos grãos de 1,00 mm e aditivos superplastificante (Powerflow 4000, da MC Bauchemie) e modificador de viscosidade (Centrament Stabi 520, também da MC Bauchemie).

Foram necessárias adequações no traço de acordo com as adições minerais. Para tanto, foram obtidas novas formulações, adotando como critério de análise e escolha o ensaio de consistência, que foi realizado com o cone de Kantro, avaliando o diâmetro de espalhamento e a fluidez do material, além da presença de segregação ou exsudação.

A autora observou que a fluidez foi afetada quando a substituição de cimento por cinza volante foi de 30 e 50% (em massa), pois as partículas de cinza volante são maiores que as de cimento. Já as misturas com fibras de celulose e PVC (policloreto de vinila) apresentaram diâmetros de espalhamento maiores que a argamassa de referência, enquanto as fibras de polipropileno prejudicaram o escoamento das argamassas.

Ainda, Silva (2016) afirma que são aceitáveis valores de retração por secagem após 28 dias de até 0,8 mm/m, concluindo que o emprego de fibras de celulose contribuiu para a redução da retração, pois atuam como micro vasos capilares, favorecendo o processo de hidratação do cimento e diminuindo a perda de água para o meio externo.

Mendes (2019) desenvolveu dosagens de argamassas autonivelantes para contrapiso com a incorporação do resíduo do corte de mármore e graníticos, nas proporções de 40% e 50% da massa de cimento. Buscando avaliar as propriedades físicas e mecânicas, foram realizados ensaios nos estados fresco e endurecido,

comparando as misturas autonivelantes a um produto comercializado. Para tanto, a autora utilizou o Cimento CP II Z-32, por ser o mais utilizado em obras da região, areia com módulo de finura de 1,24 e diâmetro máximo dos grãos de 1,18mm, fíler calcário com dimensão máxima dos grãos de 146,07 μm e fibras sintéticas de polipropileno, a fim de reduzir as fissuras por retração. O resíduo do corte de mármore e graníticos (RCMG) utilizado possui diâmetro máximo dos grãos de 153,81 μm , foi caracterizado como material pulverulento e não apresentou atividade pozolânica.

O traço obtido por Mendes (2019) em argamassas autonivelantes para contrapiso foi 1:1:0,33:0,0033:0,0067, respectivamente, cimento, areia, água, aditivo superplastificante e aditivo modificador de viscosidade, considerando como parâmetro de seleção as misturas com diâmetro mínimo de espalhamento igual a 125 mm e ausência de segregação. As propriedades das argamassas autonivelantes no estado fresco (escoamento inicial, retenção de fluxo e tempo de regeneração) foram avaliadas conforme a norma americana C 1708 (ASTM, 2016) e o tempo de pega conforme a norma C 191 (ASTM, 2006), utilizando o aparato de Vicat.

A autora avaliou a resistência de aderência à tração e o tipo de ruptura de argamassas autonivelantes comerciais e com substituição de 50% da massa de cimento pelo resíduo de mármore e graníticos, utilizando como substrato uma laje de concreto armado de superfície rugosa, conforme ilustrado na Figura 7. O resultado médio de resistência de aderência à tração encontrado para a argamassa com resíduos foi de 0,51 MPa e para a dosagem comercial foi de 0,37 MPa.

Figura 7 - Ensaio de resistência de aderência à tração



Fonte: Mendes (2019)

Para a resistência à compressão aos 28 dias, a autora obteve os valores de 36,34 MPa para as argamassas com 40% de RCMG e de 32,47 MPa com 50% de RCMG. A presença do fíler na mistura com 50% de RCMG proporcionou uma redução de quase 40% na retração linear, enquanto a incorporação das fibras de polipropileno provocou uma redução de 68% (MENDES, 2019).

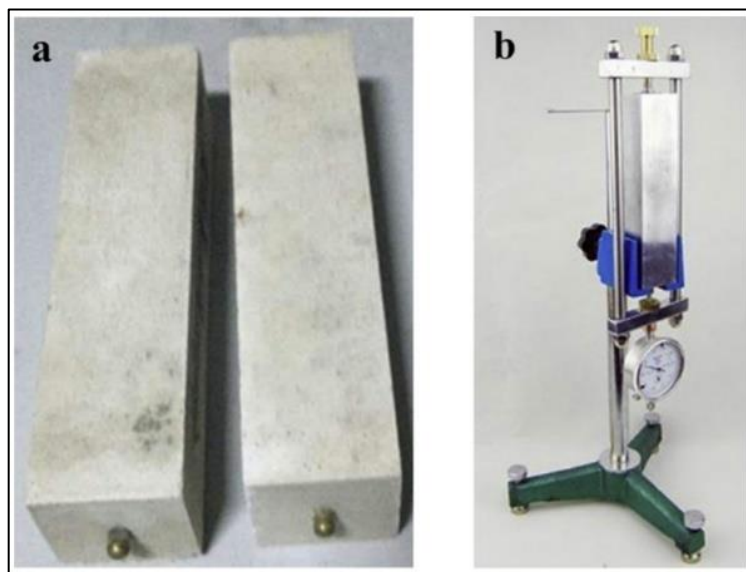
Schaefer (2013) realizou uma pesquisa sobre fontes alternativa de sulfato de cálcio para a produção de argamassas autonivelantes. O estudo trabalhou com misturas ternárias de sulfato de cálcio, cimento aluminoso e cimento Portland, pois neste tipo de composição há a formação da etringita, que é responsável pelo rápido endurecimento do material e que tem sido utilizada para compensar a retração em misturas com predomínio de cimento Portland.

O sulfato de cálcio utilizado no estudo foi o fosfogesso proveniente do município de Imbituba/SC. Foram utilizados os tempos de 2 e 4 horas e temperaturas de calcinação de 350°C, 450°C, 550°C e 650°C para verificar as diferentes formas de obter sulfatos de cálcio a partir do fosfogesso. Também foram utilizados 3 tipos diferentes de cimento: cimento Portland CP II-F, CP V-ARI e cimento Aluminoso. Os parâmetros mínimos selecionados para que as argamassas fossem consideradas viáveis foram resistência à compressão de 10 MPa após 24 horas e de 20 MPa aos 28 dias, espalhamento entre 250 e 270 mm e ausência de segregação. Schaefer (2013) verificou que o tipo de sulfato de cálcio influenciou na estabilidade dimensional das misturas, podendo concluir que quanto maior a temperatura de calcinação do sulfato de cálcio, menor a variação dimensional.

Yang, Zhang e Yan (2016) avaliaram as propriedades de argamassas autonivelantes utilizando o fosfogesso natural, com tamanho médio das partículas de 51,6 µm, cimento Portland comum, cimento aluminoso, agregado miúdo com duas granulometrias diferentes (30-50 *mesh* e 40-70 *mesh*) e aditivos. Os autores concluíram que o resíduo contribuiu com o processo de hidratação do cimento, tornando possível a utilização em argamassas autonivelantes, mesmo quando o percentual de fosfogesso é de 55%. Além disso, concluíram que a combinação dos dois tipos de cimento é a mais adequada para obter altas resistências iniciais e que a fluidez pode ser melhorada utilizando duas granulometrias de agregado fino. Outrossim, os autores observaram que os custos das misturas com fosfogesso foram consideravelmente menores quando comparados às argamassas autonivelantes tradicionais.

Neste estudo, o acompanhamento da retração linear foi realizado utilizando um relógio comparador. As amostras de argamassas foram colocadas em moldes prismáticos de aço e desmoldadas após 24 horas. Os corpos de prova e o equipamento utilizado estão representados na Figura 8.

Figura 8 - Corpos de prova (a) e equipamento utilizado (b) no acompanhamento da retração linear

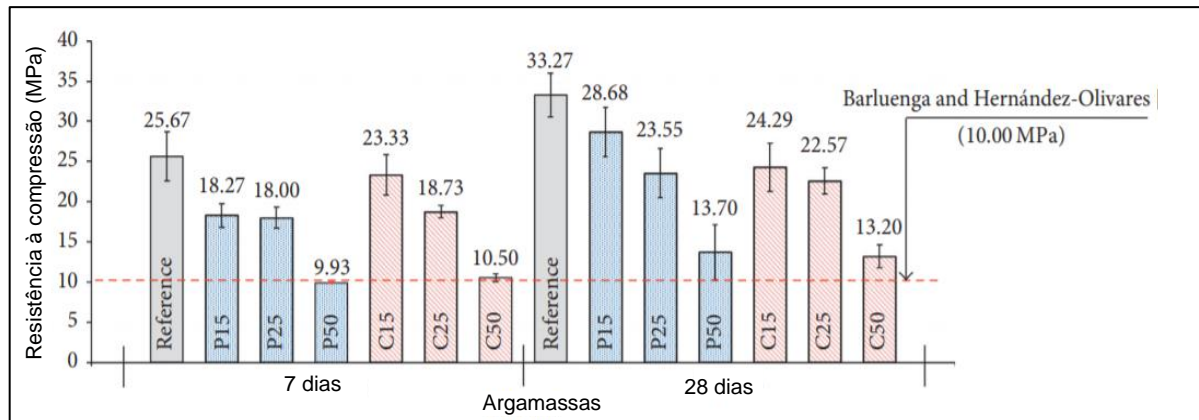


Fonte: Adaptado de Yang, Zhang e Yan (2016)

Pereira e Camarini (2018) estudaram argamassas autonivelantes com a adição de resíduos de porcelana e de cerâmica vermelha (proveniente de resíduos de construção e demolição), com granulometrias menores que 250 μm , para melhorar as propriedades pozolânicas. Os autores avaliaram as propriedades das misturas substituindo o Cimento CP V-ARI por 15%, 25% e 50%, em massa, de cada resíduo. As propriedades de fluidez foram avaliadas através do Cilindro Espanhol e as argamassas produzidas com 50% de porcelana (P50) e 50% de cerâmica vermelha (C50) apresentaram segregação, conforme ilustrado na Figura 10.

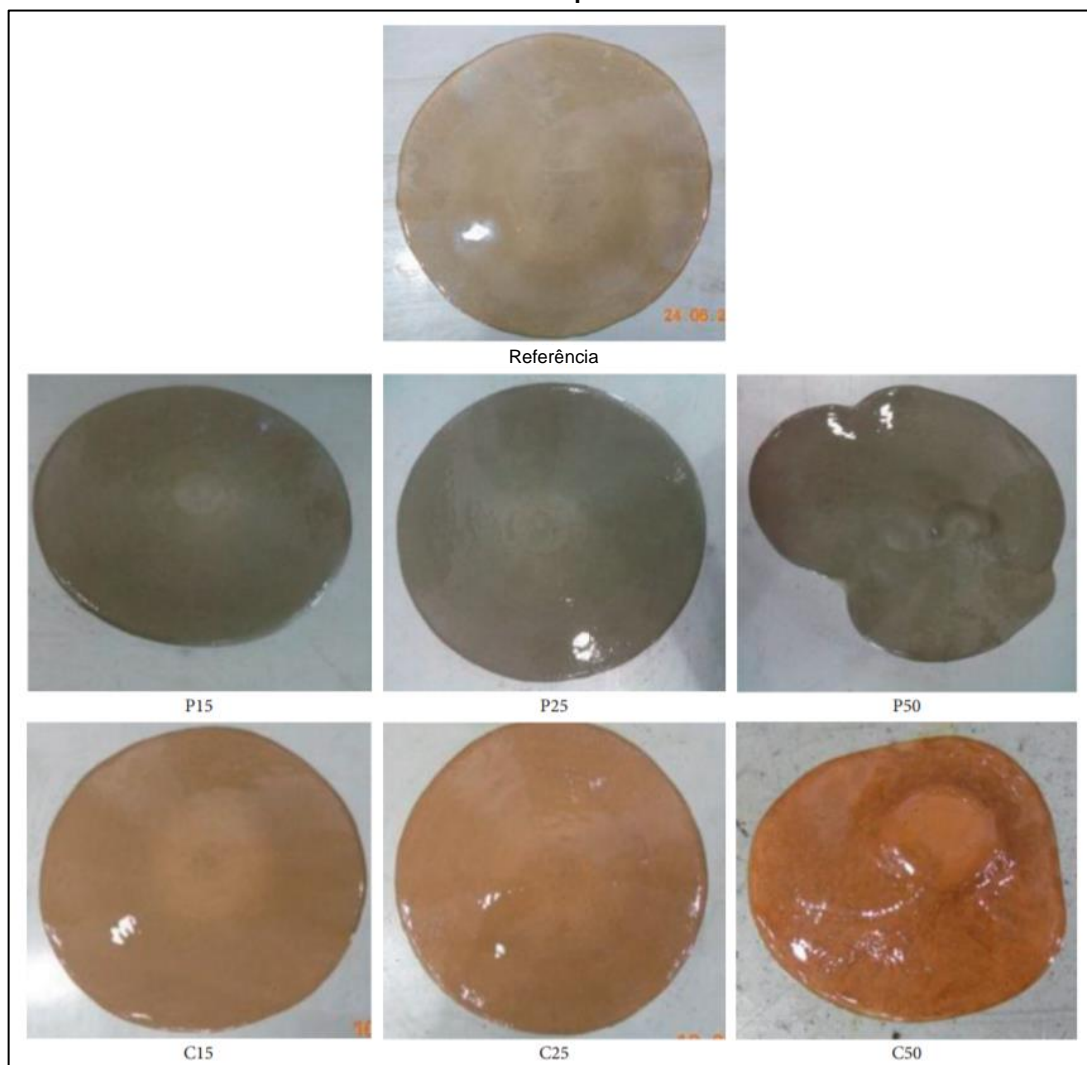
Em todas as argamassas, as resistências foram afetadas com a incorporação dos resíduos, porém os valores de resistência à compressão ainda foram superiores ao estabelecido na literatura, que é de 10 MPa, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 9. As argamassas autonivelantes com 15% e 25% de substituição de cimento por porcelana, em massa, demonstraram maior potencial de utilização.

Figura 9 - Resultados de resistência à compressão das argamassas autonivelantes produzidas com substituições do cimento, em massa, por 15, 25 e 50% de porcelana (P) e cerâmica vermelha (C) aos 7 e 28 dias



Fonte: Adaptado de Pereira e Camarini (2018)

Figura 10 - Determinação do diâmetro de espalhamento das argamassas autonivelantes utilizando o Cilindro Espanhol



Fonte: Adaptado de Pereira e Camarini (2018)

2.2.2 Vantagens e desvantagens da utilização da argamassa autonivelante

Branco e Brito (2014) observaram em seus estudos que o uso de contrapiso autonivelante, em substituição ao sistema tradicional de contrapiso, reduziu em 46,54% o tempo necessário para aplicação do produto. Além disso, os autores relataram a diminuição do volume de estoque de agregados no canteiro de obras, aceleração do cronograma e melhoria no planejamento físico da obra. Outras vantagens do uso da argamassa autonivelante citadas por Amorim (2015) são a possibilidade de execução da camada de contrapiso com menores espessuras, otimização do transporte vertical, elevada produtividade e bom acabamento superficial.

Nakakura e Bucher (1997) afirmam que a utilização da argamassa autonivelante permite a execução de 50 a 100 metros quadrados de contrapiso por hora por pessoa, e que a superfície pode ser liberada após 2 a 3 horas da execução do serviço. No entanto, assim como em argamassas tradicionais, o assentamento do revestimento só poderá ser realizado após 14 dias (SOUZA, 2013).

Pinho (2015) efetuou um comparativo de produtividade e custos entre a argamassa para contrapiso tradicional e a argamassa autonivelante em dois edifícios idênticos, com 18 pavimentos e 9.000 metros quadrados de contrapiso cada. Ele concluiu que uma equipe formada por 5 pessoas executava 500 metros quadrados por dia de contrapiso autonivelante, enquanto no sistema convencional de contrapiso foram necessárias 12 pessoas para produzir 204,54 metros quadrados por dia. No entanto, quando avaliado o custo de material e mão de obra, a argamassa autonivelante foi 5,5% mais cara.

A utilização do produto, porém, apresenta algumas desvantagens, como o entupimento dos mangotes durante o bombeamento quando o produto não possui fluidez adequada e a falta de conhecimento relacionado à aplicação e produção das empresas fornecedoras (BRANCO; BRITO, 2014). Soma-se a isto, a necessidade de uma empresa fornecedora próxima à obra e de agendamento prévio, além da dificuldade de aplicá-la em locais com declividades e caimentos, como banheiros e cozinhas (AMORIM, 2015; SOUZA, 2013).

Outra desvantagem citada por Yang, Zhang e Yan (2016) é o alto custo associado ao elevado consumo de cimento e de aditivos químicos, destacando a utilização de resíduos como alternativa para redução destes custos.

2.3 UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS

A preocupação com o desenvolvimento sustentável representa a possibilidade de garantir mudanças que diminuam o comprometimento dos sistemas ecológicos e sociais que sustentam a sociedade. É cada vez mais necessário o processo de transformação do cenário urbano, crescentemente ameaçado e diretamente afetado por riscos socioambientais. Neste sentido, a gestão de resíduos sólidos possibilita a formulação de soluções minimizadoras. A responsabilidade sobre os subprodutos industriais é complexa e interdependente. Avanços na redução, reutilização e reciclagem devem contar com a participação de entidades públicas, da sociedade civil e do setor empresarial (SPADOTTO; RIBEIRO, 2006).

Além disso, o uso de adições ou substituições de cimento ou areia por resíduos em misturas cimentícias reduz a energia e intensidade de emissões de CO₂. Os subprodutos industriais têm recebido crescente interesse devido à sua alta reatividade, baixo custo e maior disponibilidade em algumas regiões (ATAIE; RIDING, 2013).

Desta forma, a utilização de resíduos industriais como alternativa aos materiais naturais utilizados em misturas cimentícias é um caminho viável para o reaproveitamento de materiais e diminuição dos impactos ambientais causados pelo setor da construção civil (CABRAL; AZEVEDO, 2016).

2.4 MATERIAIS

Os materiais constituintes das argamassas autonivelantes devem ser cuidadosamente selecionados, a fim de obter uma mistura com composição e estrutura granular adequada. As propriedades dos materiais escolhidos, como morfologia da superfície, módulo de finura, distribuição granulométrica e reações de hidratação podem afetar de forma positiva ou negativa o desempenho das argamassas (FELEKOGLU *et al.*, 2006).

2.4.1 Cimento

O cimento Portland comum é um produto composto por clínquer e sulfato de cálcio e os cimentos Portland compostos são formados a partir da adição ou

substituição do clínquer por fíler calcário, materiais pozolânicos e escórias (JOHN; CINCOTTO, 2007). Trata-se do principal composto aglomerante da pasta, desempenhando a função de ligante hidráulico. É formado por silicatos e aluminatos de cálcio que, em contato com a água, hidratam-se e dão rigidez à mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Durante a mistura e subsequente cura dos materiais cimentícios, as partículas de cimento reagem com a água, resultando em uma reação química exotérmica denominada hidratação (LASSEUGUETTE *et al.*, 2019). A hidratação do cimento Portland é um processo complexo devido a três principais compostos: silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), aluminato de cálcio (C_3A) e ferrita (C_4AF). Estes materiais constituintes são obtidos a partir da calcinação de calcário e argila, fontes de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , resultando no clínquer. O sulfato de cálcio é incorporado em pequenas quantidades ao cimento, com a função de regularizar o tempo de início das reações de hidratação do cimento com a água (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O teor de sulfato de cálcio adicionado intencionalmente ao Cimento Portland varia entre 2 e 5%, em função do teor de reatividade do C_3A (aluminato tricálcico) do clínquer, da presença de álcalis e da finura do cimento. O sulfato de cálcio é encontrado no cimento sob as formas de di-hidrato ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), hemidrato ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$) e anidrita ($CaSO_4$). No processo de hidratação do cimento, o enrijecimento prematuro da pasta aliado a uma acentuada liberação de calor ocorre quando há falta de sulfato de cálcio (BATTAGIN, 2011).

A forma de sulfato de cálcio mais utilizada como adição ao cimento é a gipsita, podendo ser de origem natural ou sintética. A distribuição geológica irregular dos depósitos de gipsita natural, localizadas principalmente nos estados de Pernambuco, Ceará e Piauí, em conjunto com as grandes proporções de rejeitos industriais da fabricação do ácido fosfórico nas regiões Sul e Sudeste do país, incentivaram a industrialização do sulfato de cálcio di-hidratado obtido no processo de obtenção do ácido fosfórico, a partir do minério de apatita, conhecido como fosfogesso, gerando um produto com desempenho similar ao da gipsita natural e que contribui com a questão ambiental.

No entanto, sabe-se que algumas características do fosfogesso são favoráveis e outras desfavoráveis para sua aplicação no cimento, pois a presença de contaminações residuais de flúor e P_2O_5 pode retardar a pega e influenciar no desempenho mecânico (BATTAGIN, 2011).

A função do cimento, quando em contato com a água, é de aglomerar as partículas, ligando-as através da formação de produtos hidratados, recebendo a denominação de ligante hidráulico. A interação do cimento com a água origina a reação de hidratação, através dos constituintes anidros presentes na mistura, que se transformam através da incorporação dos íons OH^- à sua estrutura cristalina (JOHN; CINCOTTO, 2007).

John e Cincotto (2007) explicam ainda que as reações de hidratação que ocorrem são simultâneas e possuem cinética e liberação de energia próprias ao longo da evolução da hidratação, passando pelas fases de dissolução do cimento, nucleação dos primeiros produtos hidratados, difusão dos reagentes e crescimento dos produtos. Portanto, o acompanhamento da evolução das reações e liberação do calor nas primeiras horas é de grande importância em tecnologia de materiais cimentícios.

A fabricação do cimento consome, por ano, cerca de 3% do uso global de matéria primária, além de produzir aproximadamente 0,87 toneladas de dióxido de carbono para cada tonelada de cimento produzido. Com isso, aumentam as cobranças para que as indústrias de cimento diminuam o consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa, buscando-se materiais alternativos com características similares (DAMTOFT *et al.*, 2008).

Não há consenso na literatura a respeito do cimento adequado a ser utilizado em argamassas autonivelantes, porém a escolha deve ser feita com base nas características desejadas, pois estas influenciam as propriedades mecânicas, de fluidez e reológicas da mistura, além da velocidade de reações químicas durante a pega e o endurecimento (MARTINS, 2009). De acordo com Silva (2016), a utilização de cimentos mais finos resulta em reações de hidratação mais rápidas, causando retração e, conseqüentemente, a fissuração.

2.4.2 Agregados

Na composição de argamassas autonivelantes deve-se utilizar agregados miúdos e com granulometria contínua (MARTINS, 2009), pois agregados com frações mais grossas aumentam a viscosidade da matriz, comprometendo o espalhamento e bombeamento da argamassa. No entanto, materiais com pouca viscosidade originam

problemas de segregação e exsudação (KATSIADRAMIS; SOTIROPOLOU; PANDERMARAKIS, 2010).

Areias naturais com granulometria fina e baixo módulo de finura são recomendadas para composições de argamassas autonivelantes, com dimensões de 2 mm (RIZWAN; BIER, 2011).

2.4.3 Adições minerais

O Cimento Portland possui uma variedade de materiais que podem ser utilizados para substituí-lo na produção de concretos e argamassas, em porcentagens determinadas, entre eles a cinza volante, escória de alto forno e sílica ativa (JUENGER *et al.*, 2011). Estes materiais são denominados de adições minerais e, de acordo com Mehta e Monteiro (2014) são materiais silicosos finamente moídos, adicionados aos concretos e argamassas em quantidades que variam de 6 a 70% da massa de material cimentício. O uso de adições minerais na produção de misturas colabora com a redução do consumo de energia, pois geralmente incorporam quantidades consideráveis de energia, como também podem reduzir as distâncias de transporte de matérias-primas (MOLIN, 2011).

A adição de minerais reativos pode substituir parte da quantidade de cimento, resultando em diminuição dos custos do material final, pois por possuírem tamanho médio entre o agregado miúdo e o cimento, promovem o preenchimento dos vazios da mistura (SAHMARAN; CHRISTIANTO; YAMAN, 2006).

De acordo com Silva (2016), o preenchimento dos vazios existentes proporciona melhor fluidez das argamassas cimentícias, pois a forma, textura e granulometria exercem influência no comportamento das misturas, facilitando o contato entre as partículas e reduzindo o atrito. Em geral, a incorporação de adições minerais às misturas cimentícias resulta em produtos com melhores características técnicas. Porém, as vantagens da incorporação destes materiais em substituição ao Cimento Portland dependem da finura e forma das partículas, área superficial específica, relação água/aglomerante, composição química e mineralógica e a quantidade de adição (MOLIN, 2011).

Mehta e Monteiro (2014) também explicam que as adições podem ser classificadas em inertes ou reativas. Quando classificadas como inertes, promovem um efeito físico dentro da pasta cimentícia enquanto as reativas participam da

formação de hidratos. Molin (2011) agrupa as adições de acordo com suas características físico-químicas, em: material pozolânico, material cimentante e fíler.

Materiais pozolânicos são materiais que possuem pouca propriedade cimentícia, porém quando finamente divididos e na presença de umidade reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente no cimento Portland, formando compostos com propriedades cimentantes (MOLIN, 2011), característica denominada atividade pozolânica. Os parâmetros fundamentais para caracterizar um material que se pretenda utilizar como pozolânico são área superficial específica e taxa de reação pozolânica, influenciando nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais cimentícios (JOHN; CINCOTTO, 2007).

Quando estes materiais são incorporados às misturas cimentícias, há uma outra fase de hidratação, denominada hidratação secundária. Nesta fase, materiais constituídos por silicato de alumínio reagem com o hidróxido de cálcio (CH) produzido durante a hidratação primária. Isto produz uma quantidade maior de silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) e aluminato de cálcio (C_3A), criando um maior número de ligações (LASSEUGUETTE *et al.*, 2019).

Já os materiais cimentantes não necessitam do hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes, porém sua hidratação é bastante lenta, dificultando seu uso como material estrutural. Por fim, o fíler é uma adição que não possui atividade química, sendo utilizado para o empacotamento granulométrico das misturas e como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (MOLIN, 2011).

2.4.4 Aditivos químicos

A NBR 11768 (ABNT, 2019), que trata dos aditivos químicos para concretos de cimento Portland, define aditivo como produto adicionado e misturado à pasta, em quantidade geralmente não superior a 5% da massa de cimento total, com o objetivo de modificar as propriedades no estado fresco e/ou endurecido.

Schaefer (2013) e Martins (2009) afirmam que o uso de aditivos em argamassas autonivelantes é indispensável, especialmente os aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade. O primeiro é responsável por garantir a fluidez da mistura, enquanto o segundo é responsável pela estabilidade das argamassas, evitando a segregação.

2.4.4.1 Aditivo superplastificante

Aditivos superplastificantes são aqueles que permitem reduzir a quantidade de água da mistura sem alteração da consistência do concreto, ou modificar a consistência da mistura sem alterar a quantidade de água, resultando no aumento do abatimento e da fluidez, conforme definição da NBR 11768 (ABNT, 2019).

Estes aditivos são utilizados com a finalidade de reduzir o consumo de água para aumentar a resistência e durabilidade das misturas, mantendo a consistência, aumentar a fluidez sem alterar o consumo de água e reduzir a quantidade de cimento, através da manutenção da consistência e resistência à compressão, permitindo reduzir a retração, a fluência e as tensões térmicas. A função destes aditivos é espalhar as partículas de cimento em processo de hidratação, liberando a água presa entre seus grãos e produzindo uma repulsão entre grãos de cimento adjacentes, devido à combinação de forças eletrostáticas e/ou estéricas. Como consequência deste processo, a água aprisionada é liberada, aumentando a fluidez da mistura (HARTMANN *et al.*, 2011).

Os aditivos superplastificantes, também chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência, podem reduzir a água da mistura em mais de 12% e, dependendo da dosagem utilizada pode-se reduzir mais de 30%. A faixa de dosagem usual é entre 0,6 e 2% da massa de materiais cimentícios. Estes aditivos são divididos em três principais tipos químicos: lignosulfonatos, polímeros condensados de formaldeído-sulfonatos de naftaleno ou melamina e os éteres de policarboxilato (DRANSFIELD, 2003).

O cimento, ao entrar em contato com a água, apresenta tendência de floculação, aprisionando água entre os grãos, diminuindo a disponibilidade de água para a mistura e reduzindo a área específica dos grãos de cimento disponível para a hidratação (DRANSFIELD, 2003). A tendência a flocular ocorre devido à natureza polar da molécula de água e das forças de *Van der Waals* entre as partículas de cimento, originadas no processo de moagem do clínquer e/ou adições minerais. Essas forças existentes entre os grãos de cimento e as moléculas de água formam uma ligação forte, impedindo a mistura completa do concreto (HARTMANN *et al.*, 2011). Os aditivos redutores de água dispersam as partículas de cimento em hidratação, gerando uma repulsão entre os grãos, liberando a água aprisionada nos flocos de cimento e aumentando a fluidez da mistura (DRANSFIELD, 2003).

Os aditivos à base de policarboxilato atuam por repulsão eletrostática e efeito estérico. A dispersão dos grãos de cimento ocorre devido à repulsão estérica produzida pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero, causando a dispersão entre as partículas (DRANSFIELD, 2003). Devido à presença de cadeias laterais durante a hidratação inicial, os superplastificantes à base de policarboxilato podem resultar em maiores períodos de retenção do abatimento (SCHAEFER, 2013).

2.4.4.2 Aditivo modificador de viscosidade

Hartmann *et al.* (2011) definem aditivos modificadores de viscosidade como polímeros, à base de polissacarídeos, solúveis em água que são adicionados aos concretos ou argamassas buscando modificar suas propriedades reológicas, promovendo redução na tendência a exsudação e segregação. Martins (2009) afirma que o uso destes aditivos em quantidades adequadas auxilia na coesão e estabilidade dos materiais componentes da mistura, pois mantêm as partículas finas da mistura suspensas, através de uma “formação de rede”.

As principais aplicações do aditivo modificador de viscosidade são: redução da segregação de concretos altamente fluídos e autoadensáveis, redução da fricção e pressão do concreto bombeável, compensação da fração fina em agregados miúdos e redução do teor de finos em concretos autoadensáveis. Em misturas autonivelantes, estes aditivos podem minimizar as fissuras por retração plástica que ocorrem em função da perda de água pelo substrato e superficial, resultando em perda de aderência (EFNARC, 2006).

2.4.5 Resíduo de fosfogesso

Schaefer (2013) classifica as argamassas autonivelantes em dois tipos: à base de sulfato de cálcio (comumente anidrita) e à base de cimento (Portland ou Sulfoaluminoso). Uma das fontes de sulfato de cálcio para as argamassas é o fosfogesso, ou gesso químico, que origina a anidrita após o tratamento térmico. As argamassas produzidas com este material apresentam como característica rápido endurecimento, pouca retração e fissuração, boa resistência mecânica (valores superiores a 20 MPa aos 28 dias) e menores espessuras, quando comparadas a

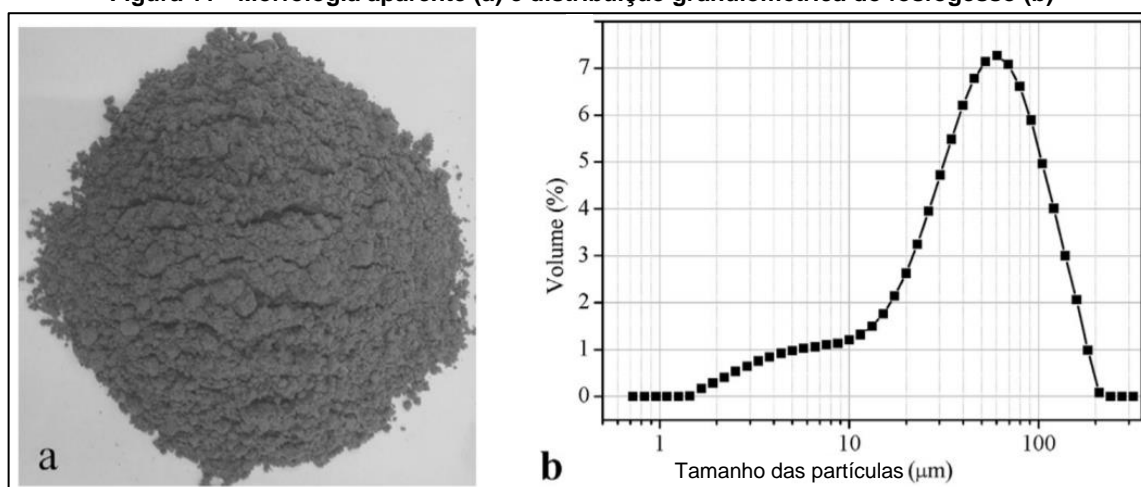
argamassas autonivelantes à base de cimento, no entanto são sensíveis à umidade. Além disso, em função da solubilidade do sulfato de cálcio, não são recomendadas para ambientes externos.

O fosfogesso é um subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados, gerado durante o processo de obtenção do ácido fosfórico (H_3PO_4), onde são produzidas aproximadamente 5 toneladas de resíduo por cada tonelada de ácido fosfórico (H_3PO_4) produzido. Tendo em vista o crescimento contínuo da população, resultando no aumento da produção de alimentos e de fertilizantes, nota-se um aumento considerável nos depósitos de fosfogesso (RASHAD, 2017). O acúmulo de fosfogesso oriundo destas indústrias ocupa consideráveis porções de terra e resulta em sérios problemas ambientais (YANG; ZHANG; YAN, 2016).

A agricultura é a maior consumidora do fosfogesso, com 4,5 milhões de toneladas por ano neste setor. Conhecido na agricultura como gesso agrícola, é amplamente utilizado como fonte de nutrientes para plantações e condicionador de solos sódicos e argilosos (NUERNBERG; RECH; BASSO, 2005), sendo comercializado nas mesmas condições em que é formado (ALVES, 2015). Na construção civil, a maior aplicação do fosfogesso é na indústria de cimento, chegando a 1,7 milhões de toneladas por ano (AQUINO, 2005).

A morfologia e distribuição granulométrica do fosfogesso utilizado no trabalho de Yang, Zhang e Yan (2016) está ilustrada na Figura 11, com o tamanho das partículas variando entre 1,6 e 208,9 μm , e tamanho médio de 51,6 μm .

Figura 11 - Morfologia aparente (a) e distribuição granulométrica do fosfogesso (b)

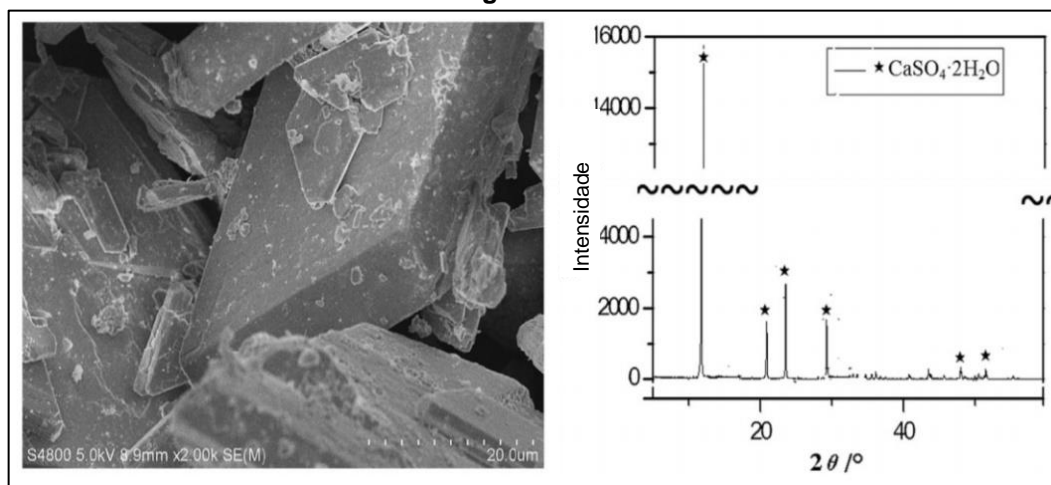


Fonte: Adaptado de Yang, Zhang e Yan (2016)

Este resíduo é geralmente composto por di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), diferentes impurezas, como P_2O_5 e F^- e substâncias orgânicas (ácido fosfórico, fosfatos e fluoritas), podendo conter elementos radioativos de ocorrência natural, que variam conforme a composição da rocha fosfática de origem (SCHAEFER, 2013). As impurezas podem ser minimizadas através de lavagem e tratamento térmico (DEGIRMENCI, 2008).

A Figura 12 mostra a micromorfologia do fosfogesso sem tratamento passando na peneira de 120 μm e a difração de raios-X (DRX), mostrando que o principal componente deste produto natural é o di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX) do fosfogesso natural



Fonte: Adaptado de Hua, Wang e Yao (2016)

Nos estudos de Yang, Zhang e Yan (2016), na composição química determinada por fluorescência de raios-X (FRX) do fosfogesso, observa-se a predominância de SO_3 (trióxido de enxofre) e CaO (óxido de cálcio). A Tabela 1 apresenta alguns resultados da análise química por FRX do fosfogesso natural e do fosfogesso calcinado a 450 $^{\circ}\text{C}$, formando a anidrita, obtidos por alguns autores.

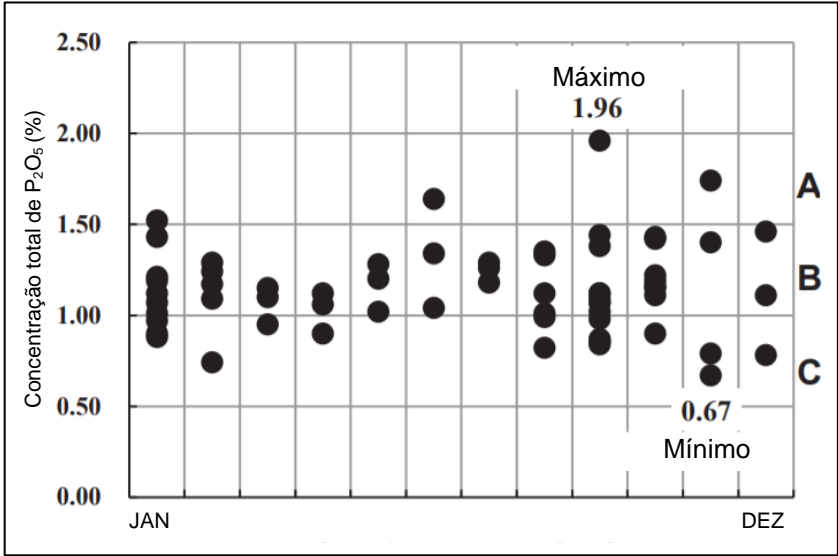
As concentrações de P_2O_5 no fosfogesso sem tratamento proveniente da empresa Vale Fertilizantes, durante o ano de 2013, foram determinadas por Holanda, Schmidt e Quarcioni (2017) e resultaram em concentrações máximas de 1,96% e mínimas de 0,67%, conforme ilustrado na Figura 13.

Tabela 1 - Resultados de ensaios de FRX do fosfogesso natural e calcinado

Material (%)	Fosfogesso natural	Fosfogesso natural	Fosfogesso natural	Fosfogesso natural	Fosfogesso calcinado a 450 °C (anidrita II)	Fosfogesso natural	Fosfogesso calcinado a 450 °C (anidrita II)
Autor	Yang, Zhang, Yan (2016)	Gong <i>et al.</i> (2019)	Oumnih <i>et al.</i> (2019)	Hyung, Han, Seo (2015)	Hyung, Han, Seo (2015)	Schaefer, Cheriaf, Rocha (2017)	Schaefer, Cheriaf, Rocha (2017)
CaO	26,76	35,62	31,51	32,28	40,97	38,56	53,53
SiO ₂	14,74	2,39	0,50	1,08	1,34	0,82	0,92
Al ₂ O ₃	0,68	0,03	0,11	0,07	0,12	0,41	0,10
Fe ₂ O ₃	0,12	0,83	0,05	0,21	0,04	0,89	1,03
SO ₃	36,97	47,10	46,90	43,29	54,93	24,59	34,10
MgO	0,11	0,62	1,59	0,05	0,00	0,00	0,00
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,04	0,05	0,00	0,00
Na ₂ O	0,43	0,00	0,03	0,00	0,06	3,99	3,85
P ₂ O ₅	4,58	1,14	0,35	0,58	0,64	1,13	1,01
Outros	15,61	12,27	18,96	22,40	1,85	29,61	5,46

Fonte: A autora (2021)

Figura 13 - Concentrações de P₂O₅ (em %) no fosfogesso, onde (A) é o intervalo superior de concentração, (B) é o intervalo médio e (C) é o intervalo mínimo



Fonte: Holanda, Schmidt e Quarcioni (2017)

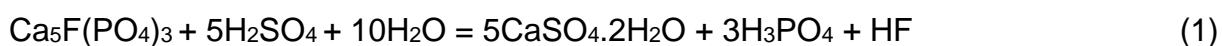
Devido à presença de impurezas e metais pesados em sua constituição, como ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²¹⁰Pb, entre outros, a produção de fosfogesso é causa de preocupação (PEREIRA, 2010). Por isso, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) regulamentou, através das Resoluções nº 147 e 187 que o nível máximo de atividade é de 1000 Bq kg⁻¹ (Unidade de medida para atividade de um radionuclídeo)

para os isótopos de ^{226}Ra e ^{228}Ra em resíduos de fosfogesso utilizados na agricultura e na indústria de cimento (CNEN, 2013, 2015).

Com isso, Narloch *et al.* (2019) desenvolveram um estudo para caracterizar e quantificar os níveis de concentração de radioatividade em argamassas produzidas com fosfogesso no Brasil através de análises espectrométricas, e concluíram que as amostras analisadas apresentaram níveis de concentração de radioatividade dentro dos limites estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais. Os resultados demonstraram que argamassas de cimento Portland apresentaram valores de atividade para o isótopo ^{226}Ra igual a 18.9 Bq kg^{-1} e as argamassas com fosfogesso resultaram em 13.12 Bq kg^{-1} .

O fosfogesso é um tipo de sulfato de cálcio di-hidratado processado e comercializado como gesso agrícola e sua calcinação, ao utilizar diferentes faixas de temperatura, produz diferentes tipos de sulfato de cálcio (SCHAEFER; CHERIAF; ROCHA, 2017). O sulfato de cálcio é encontrado em três formas diferentes, que variam conforme a temperatura de calcinação. São eles: di-hidrato ou gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemidrato ou gesso de Paris ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4). A anidrita é a forma de sulfato de cálcio mais utilizada em argamassas autonivelantes (JOHN; CINCOTTO, 2007), e pode ser encontrada sob diferentes formas, que são classificadas de acordo com a temperatura de calcinação, sendo divididas em: anidrita III, que é solúvel e reativa, anidrita II, classificada como ideal para produzir materiais de construção pouco solúveis em água e anidrita I, que é obtida em temperaturas de calcinação próximas de 1000°C , tornando-se um material inerte (SCHAEFER, 2013).

John e Cincotto (2007) explicam que o di-hidrato é formado a partir da reação que ocorre no processo de produção de fertilizantes fosfáticos, através da solubilização de rochas fosfáticas por ácidos clorídricos, nítricos ou sulfúricos. De acordo com Chen *et al.* (2018), a Equação 1 corresponde à produção de ácido fosfórico, onde H_2SO_4 é o ácido sulfúrico, H_2O é a água, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ é o sulfato de cálcio di-hidratado, H_3PO_4 é o ácido fosfórico e HF é o ácido fluorídrico.



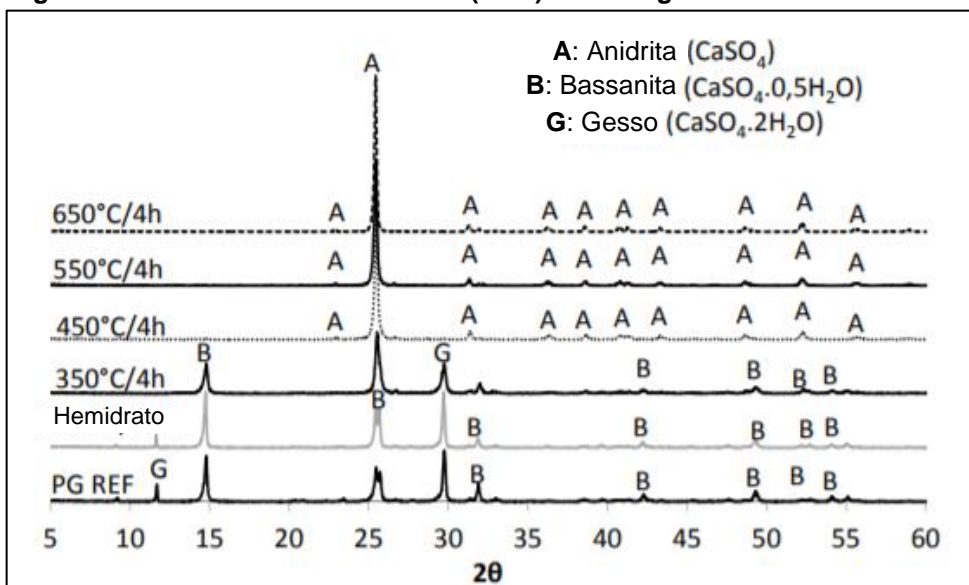
O hemidrato é obtido em temperaturas entre 140 e 160°C . Já no intervalo de temperatura de 160 e 250°C obtém-se a anidrita III, que, quando atinge a temperatura de 300°C , transforma-se em anidrita II (CaSO_4). Quando resultam em temperaturas

superiores a 800 °C não são mais consideradas puras, pois apresentam óxido de cálcio, proveniente da dissociação térmica do CaSO_4 (JOHN; CINCOTTO, 2007).

O fosfogesso obtém propriedades físicas parecidas com a do gesso, utilizado na construção civil, quando é aquecido a uma temperatura de 160 °C, sendo de fundamental importância o tratamento térmico quando se deseja valorizar o fosfogesso para estes fins (SCHAEFER, 2013).

Quanto maior a temperatura utilizada na calcinação do sulfato de cálcio, maior a quantidade de etringita formada e, conseqüentemente, maior resistência nas idades iniciais (SIEVERT, WOLTER, SINGH, 2005). Já em relação ao período de calcinação, quanto mais longo o período (aproximadamente 4 horas), maiores são os picos de intensidade de formação de anidrita. A Figura 14 ilustra a difratometria de raios-X (DRX) do fosfogesso natural e do fosfogesso calcinado durante o período de 4 horas nas temperaturas de 350 °C, 450 °C, 550 °C e 650 °C, mostrando os picos de formação de anidrita (A), hemidrato ou gesso de Paris (B) e di-hidrato ou gesso (G) (SCHAEFER; CHERIAF; ROCHA, 2017).

Figura 14 - Difratometria de Raios-X (DRX) do fosfogesso natural e calcinado

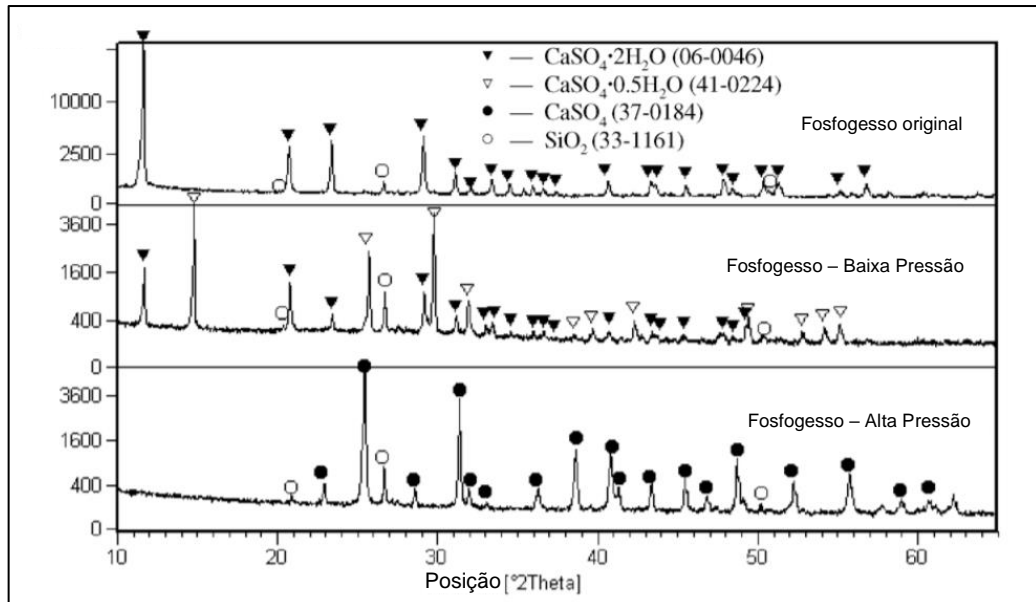


Fonte: Schaefer, Cheriaf, Rocha (2017)

Yang *et al.* (2009) produziram dois tipos de fosfogesso. Um deles foi tratado a temperatura de 120 °C em baixa pressão (0,12 MPa) por 16 horas e um outro a temperatura de 180 °C em alta pressão (0,80 MPa) por 8 horas. A fim de verificar as alterações morfológicas nos cristais do subproduto, os autores realizaram os ensaios DRX (difratometria de raios-X) e MEV (microscopia eletrônica de varredura). A Figura

15 mostra os ensaios DRX das amostras. Observa-se a presença de sulfato de cálcio di-hidratado no fosfogesso sem tratamento, do hemidrato no fosfogesso tratado à baixa pressão e de formação do cristal anidro no fosfogesso tratado em alta pressão.

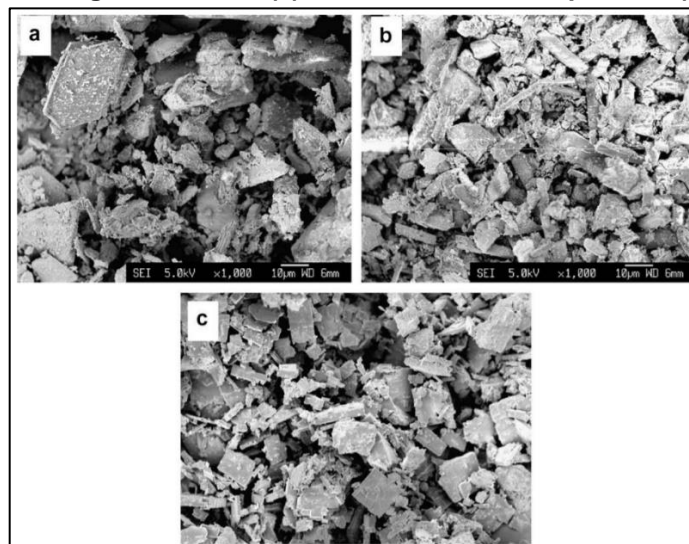
Figura 15 - Ensaio DRX para o fosfogesso natural e tratado termicamente



Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2009)

A Figura 16 mostra os resultados da MEV, obtidos por Yang *et al.* (2009). Pode-se notar que o fosfogesso natural apresenta cristais heterogêneos e de tamanho maior, enquanto as amostras que receberam tratamento são mais homogêneas e de menores dimensões, apresentando maior área específica (YANG *et al.*, 2009).

Figura 16 - MEV do fosfogesso natural (a), calcinado em baixa pressão (b) e alta pressão (c)



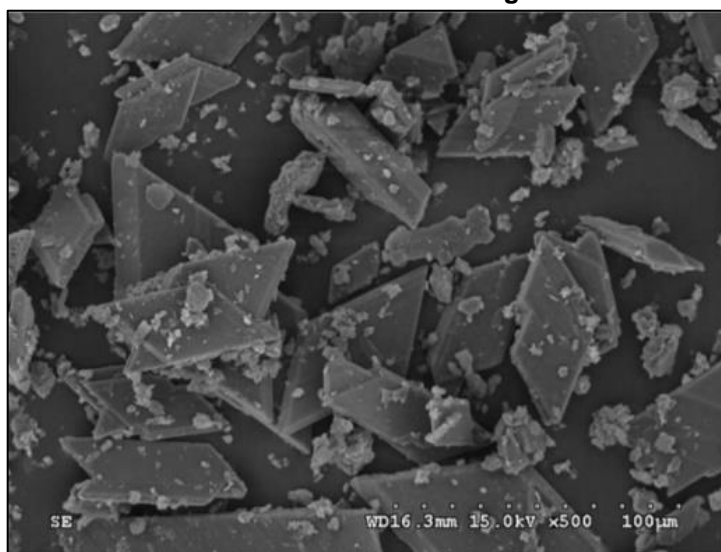
Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2009)

Degirmenci (2008) estudou misturas com fosfogesso, no estado natural e calcinado a 150 °C durante duas horas, para a composição de materiais de construção. Os autores concluíram que a absorção de água do material diminuiu com o fosfogesso calcinado e que a resistência a compressão apresentou queda com o aumento da porcentagem de fosfogesso sem tratamento. Gong *et al.* (2019) explicam que isto ocorre pois a calcinação remove algumas impurezas do resíduo, principalmente o P_2O_5 (pentóxido de fósforo), que possui alta absorção de água e, de acordo com Holanda, Schmidt e Quarcioni (2017) influencia nas primeiras horas da reação de hidratação, não alterando a formação de produtos hidratados após 72 horas de cura.

Além disso, a adição de fosfogesso calcinado em misturas cimentícias é benéfica pois a dissolução da anidrita, obtida após o processo de calcinação, é menor que a taxa de dissolução do fosfogesso di-hidrato, produzindo menos íons sulfatos e melhorando o desempenho das argamassas (GONG *et al.*, 2019).

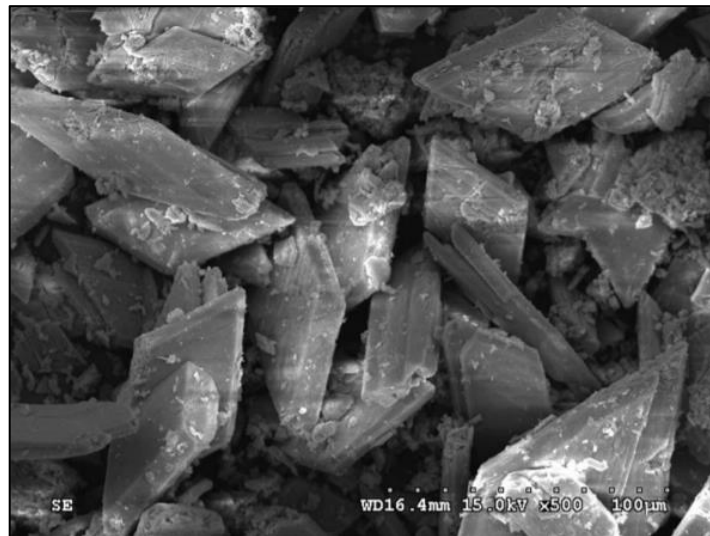
A Figura 17 corresponde à análise microestrutural do fosfogesso natural, ou seja, sem receber nenhum tipo de tratamento, e a Figura 18 se refere ao fosfogesso calcinado à temperatura de 800 °C. No fosfogesso sem tratamento observa-se a presença de impurezas na superfície do cristal, que possui formato multilateral. Após a calcinação, nota-se que as partículas irregulares e finas aumentam e as impurezas na superfície diminuem (GONG *et al.*, 2019).

Figura 17 - Análise microestrutural do fosfogesso sem tratamento



Fonte: Gong *et al.* (2019)

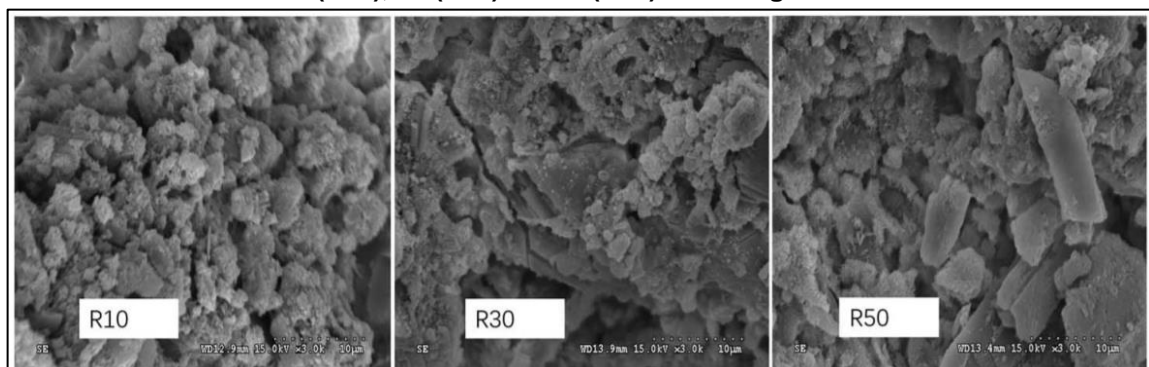
Figura 18 - Análise microestrutural do fosfogesso calcinado



Fonte: Gong *et al.* (2019)

Desta forma, o fosfogesso provoca um melhor empacotamento das partículas nas misturas cimentícias, reduzindo o espaço disponível para a água e aumentando a densidade da argamassa, provocando um aumento na resistência à compressão e na durabilidade das misturas, sendo mais evidente no fosfogesso calcinado. Também a aderência superficial do fosfogesso com o cimento é boa devido a sua textura, ficando homogeneamente distribuído na argamassa, pois o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de cálcio di-hidratado ou gipsita) preenche os poros entre a etringita e forma um esqueleto denso (GONG *et al.*, 2019), conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Análise microestrutural aos 28 dias de argamassas de cimento com adição de 10 (R10), 30 (R30) e 50% (R50) de fosfogesso

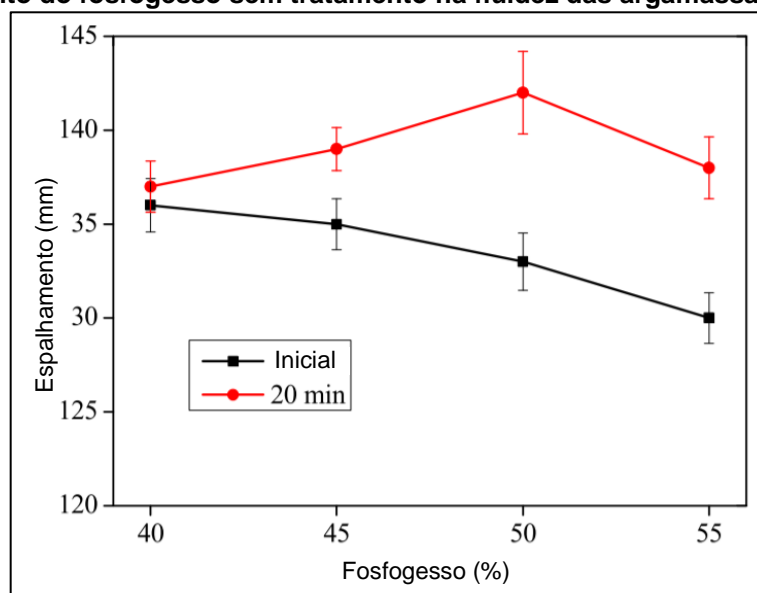


Fonte: Gong *et al.* (2019)

O efeito da adição do fosfogesso sem tratamento na fluidez das argamassas autonivelantes utilizando cimento Portland comum e cimento Sulfoaluminoso foi

estudado por Yang, Zhang e Yan (2016). A fluidez inicial diminuiu com a adição do resíduo, pois a área específica do fosfogesso é maior e sua morfologia é irregular, necessitando mais água para manter a fluidez da mistura. No entanto, após 20 minutos, a fluidez é maior que a inicial, independente da proporção de fosfogesso, conforme demonstrado no gráfico da Figura 20. O eixo X representa a proporção de fosfogesso e o eixo Y a fluidez, enquanto as linhas preta e vermelha indicam, respectivamente, a fluidez inicial e a fluidez após 20 minutos.

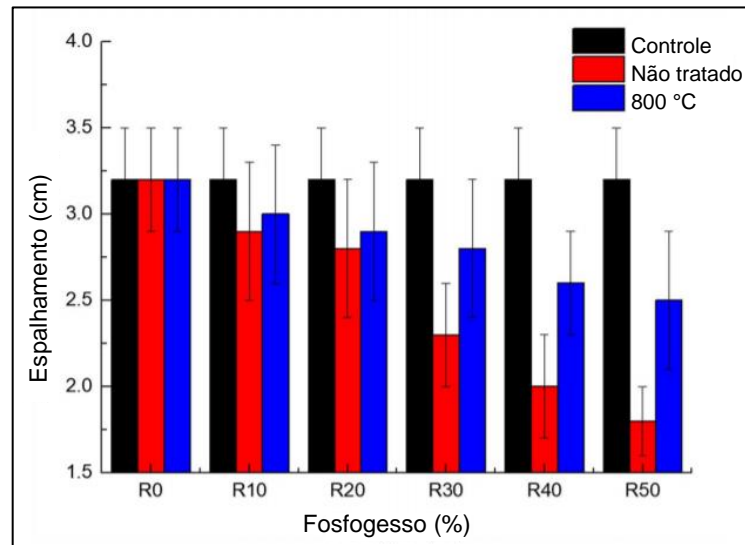
Figura 20 - Efeito do fosfogesso sem tratamento na fluidez das argamassas autonivelantes



Fonte: Adaptado de Yang, Zhang e Yan (2016)

Outro estudo, realizado por Gong *et al.* (2019), demonstrou que a adição de fosfogesso reduziu a consistência das argamassas. No entanto, argamassas com fosfogesso calcinado apresentaram resultados de fluidez melhores quando comparadas às produzidas com o fosfogesso sem tratamento. Os gráficos da Figura 21 ilustram os valores encontrados para argamassas produzidas com adições de até 50% de fosfogesso, onde as colunas em preto representam a argamassa de referência, sem adição de fosfogesso, as colunas em vermelho as argamassas produzidas com fosfogesso sem tratamento e as colunas em azul as misturas elaboradas com fosfogesso calcinado a 800 °C.

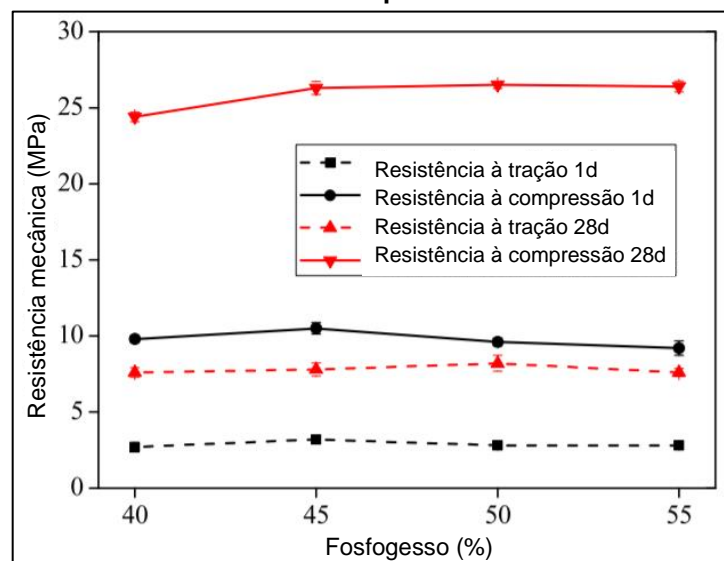
Figura 21 - Consistência de argamassas produzidas com a adição de fosfogesso não tratado e calcinado



Fonte: Adaptado de Gong *et al.* (2019)

Yang, Zhang e Yan (2016) avaliaram a resistência à compressão e à flexão após 1 e 28 dias das argamassas autonivelantes contendo de 40 a 55% de fosfogesso natural em massa e cimento Sulfoaluminoso. Os resultados mostraram o desenvolvimento das propriedades de resistência mecânica na presença do fosfogesso, conforme ilustrado na Figura 22. As linhas pretas correspondem aos resultados obtidos após 1 dia e as linhas vermelhas os valores de resistência após 28 dias.

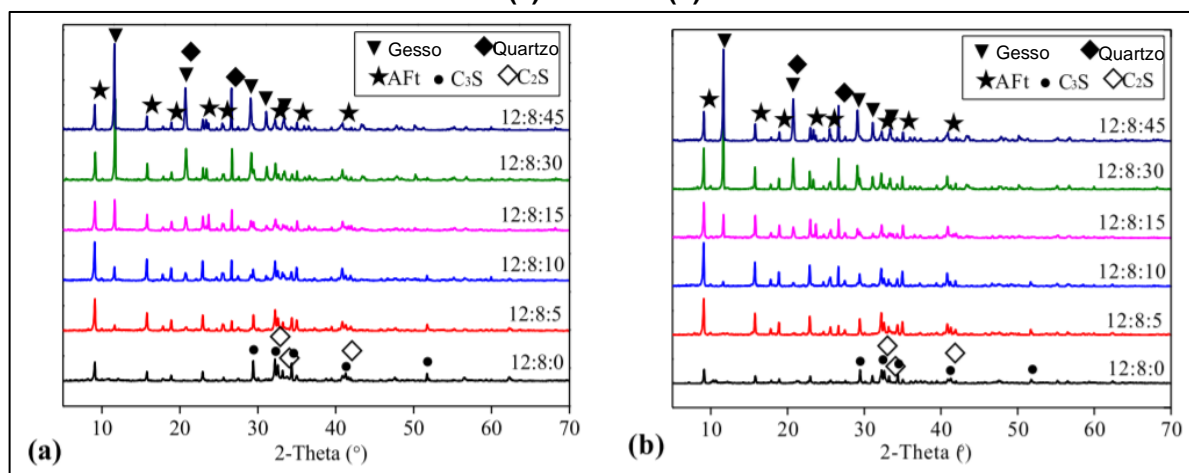
Figura 22 - Efeito do fosfogesso na resistência à compressão e à flexão das argamassas autonivelantes após 1 e 28 dias



Fonte: Adaptado de Yang, Zhang e Yan (2016)

A fim de avaliar o efeito da incorporação do fosfogesso nas argamassas autonivelantes, através da difração de raios-X (DRX), Yang, Zhang e Yan (2016) realizaram misturas contendo a proporção de materiais 12:8:fosfogesso, respectivamente cimento Sulfoaluminoso, cimento Portland comum e fosfogesso, variando de 0 a 45. Os resultados obtidos após 1 (a) e 28 dias (b) estão demonstrados na Figura 23.

Figura 23 - DRX das misturas com diferentes porcentagens de fosfogesso (0 a 45%) após 1 dia (a) e 28 dias (b)



Fonte: Adaptado de Yang, Zhang e Yan (2016)

As fases minerais determinadas foram AFt (etringita), gesso, quartzo, C₃S e C₂S, onde: AFt (etringita) é um produto da hidratação de C₄A₃ e C₃A, gesso e quartzo são trazidos pelo fosfogesso e C₃S e C₂S são minerais de cimento não hidratados. C-S-H não foi detectado devido ao seu estado não cristalino ou amorfo. Conforme demonstrado na Figura 23, o pico de difração de AFt (etringita) aumenta com a proporção de fosfogesso aumentando de 0 para 10 e se mantém constante quando $x > 10$. Além disso, os picos de difração de gesso, quando $x=10$, podem ser detectados no primeiro dia, desaparecendo aos 28 dias, devido ao consumo de C₄A₃ e C₃A da hidratação. De acordo com a análise do DRX, o fosfogesso nas misturas pode ser consumido totalmente quando $x=10$, no entanto, a quantidade é excessiva para valores maiores.

2.4.6 Resíduo de cerâmica branca

Os materiais cerâmicos são definidos como todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico, e são classificados pela Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2019) em cerâmica vermelha, materiais de revestimento, cerâmica branca, materiais refratários, isolantes térmicos, fritas e corantes, abrasivos, vidro, cimento e cal e cerâmica de alta tecnologia.

De acordo com Halicka, Ogrodnik e Zegardlo (2013), os utensílios de cerâmica podem ser divididos em dois grupos, de acordo com o material utilizado na sua produção. O primeiro grupo inclui os produtos de argila vermelha queimada, como tijolos, pisos e telhas, e o segundo grupo representa os materiais produzidos com argila branca, como cerâmica técnica (isoladores elétricos), louças sanitárias e louças de mesa.

As cerâmicas brancas são materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor. O grupo é subdividido em: louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos para alta e baixa tensão, cerâmica artística e cerâmica para fins diversos (ABCERAM, 2019), que se diferenciam, principalmente, pela temperatura de queima e pela composição da massa, que possui como materiais principais argilas plásticas de queima branca, caulins, quartzo e fundentes, como feldspato, filito, rochas feldspáticas e carbonatos (MOTTA; ZANARDO; CABRAL JUNIOR, 2001).

A cerâmica branca, de acordo com o teor em peso de água absorvida pelo corpo cerâmico, é classificada em 3 categorias. Denomina-se porcelana quando a absorção é zero, admitindo valores de até 0,5%, grês quando os materiais possuem baixíssima absorção, entre 0,5 e 3% e louça (ou faiança, maiólica, pó de pedra) quando o material é mais poroso, com absorção geralmente superior a 3%. Outra diferenciação é que as porcelanas são produzidas com massas constituídas a partir de argilominerais (argila plástica e caulim), quartzo e feldspato puros, com temperaturas de queima superiores a 1250 °C, o grês é produzido com matérias-primas menos puras, utilizando outras rochas como fundentes, ao invés do feldspato puro, e temperaturas de queima por volta de 1250 °C e a faiança é composta de uma massa semelhante ao grês, podendo incorporar alguns fundentes carbonáticos, com minerais calcita e dolomita, além de temperaturas de queima inferiores a 1250 °C (MOTTA; ZANARDO; CABRAL JUNIOR, 2001).

O processo de fabricação da cerâmica compreende, inicialmente, a etapa de preparação e homogeneização da matéria-prima, obtida por mineração, seguida pela preparação da massa, através da dosagem controlada de materiais e aditivos, que são levados ao processo de moagem. Com a granulometria adequada, é realizada a formação da peça, de acordo com a geometria e tamanhos projetados, podendo ocorrer através de colagem/fundição em molde, prensagem, extrusão ou torneamento.

Em seguida, as peças são levadas para secagem, a fim de eliminar a água proveniente do processo de preparação da massa, em temperaturas de aproximadamente 170 °C. Com isso, as peças passam pelo processo de esmaltação e decoração, adquirindo aspecto vítreo, e pelo processo de queima, com temperaturas variáveis de acordo com cada produto. Por fim, realiza-se o acabamento, classificação e embalagem das peças (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006), conforme fluxograma da Figura 24, com os impactos ambientais causados em cada etapa.

Para a produção de 1000 kg de louça de mesa são necessários, em média, 115 kg de esmalte, 760 kg de caulim, 554 kg de feldspato e 3341 kg de água, além do consumo de energia elétrica de 4,5 MJ/kg de produto e de 70 MJ/kg de produto de energia térmica (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

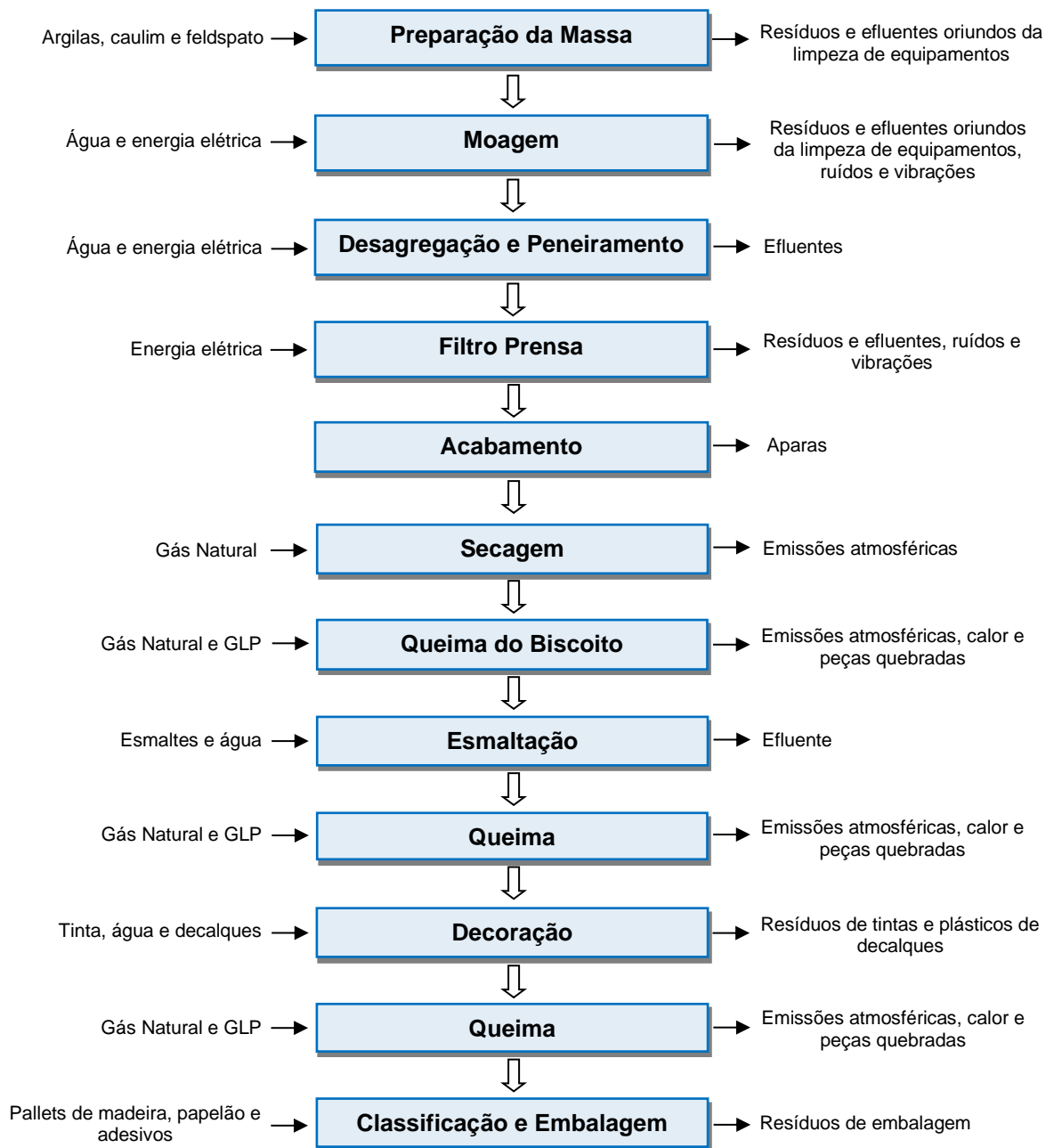
No Brasil, as empresas produtoras de cerâmica branca, aproximadamente 500 indústrias, estão concentradas principalmente nas regiões Sul e Sudeste, e são responsáveis pela produção de mais de 200 milhões de peças por ano, o que equivale a 2% da produção mundial. As maiores indústrias nacionais que atuam no segmento são a Cerâmica Oxford e a Porcelana Schmidt, em Santa Catarina, a Tirolesa, no Paraná, e a Indústrias Pozzani, em São Paulo (RUIZ *et al.*, 2011).

Os principais desafios ambientais enfrentados por estas empresas estão relacionados ao consumo de água e às perdas de material no decorrer do processo produtivo. Em média, as empresas possuem índices de 20% de perdas de matéria-prima (RUIZ *et al.*, 2011). Embora sejam materiais geralmente quimicamente inertes, os lugares onde estes materiais se acumulam, devido ao seu tamanho, provocam alterações na paisagem (LÓPEZ *et al.*, 2007).

Por se tratar de um material não biodegradável, uma das formas de reutilização destes resíduos industriais é na produção de materiais de construção (HALICKA; OGRODNIK, ZEGARDLO, 2013), tendo em vista que os resíduos de cerâmica não podem ser reaproveitados para a produção de novos materiais nas indústrias de origem (TORKITTIKUL; CHAIPANICH, 2010). Além disso, as substâncias químicas e

mineralógicas presentes na composição de alguns resíduos de cerâmica são adequadas para inclusão nas misturas cimentícias (PUERTAS *et al.*, 2008), pois possuem características positivas, como durabilidade e alta resistência a produtos químicos (TORKITTIKUL; CHAIPANICH, 2010). A Tabela 2 apresenta resultados obtidos por alguns autores da análise química por fluorescência de raios-X (FRX) de resíduos de cerâmica branca.

Figura 24 - Fluxograma do processo de fabricação e impactos ambientais da cerâmica branca - Louça de mesa



Fonte: Adaptado de Oliveira e Maganha (2006)

Tabela 2 - Resultados de ensaios de FRX da cerâmica branca

Material (%)	Cerâmica Branca	Cerâmica Branca	Cerâmica Branca	Cerâmica Branca	Cerâmica Branca
Autor	Melo (2017)	Lasseuguette <i>et al.</i> (2019)	Medina <i>et al.</i> (2013)	Torgal; Jalali (2011)	Higashiyama <i>et al.</i> (2012)
CaO	1,42	7,00	2,41	0,20	0,76
SiO ₂	66,62	68,90	67,91	65,00	70,90
Al ₂ O ₃	15,58	19,80	22,01	21,30	21,10
Fe ₂ O ₃	8,18	0,90	1,41	1,30	0,81
SO ₃	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
MgO	1,79	0,30	0,29	0,30	0,24
TiO ₂	0,83	0,70	0,45	0,20	0,33
Na ₂ O	1,18	0,30	1,91	2,50	1,47
K ₂ O	3,84	1,70	2,79	3,70	3,57
Outros	0,56	0,40	0,75	5,50	0,82

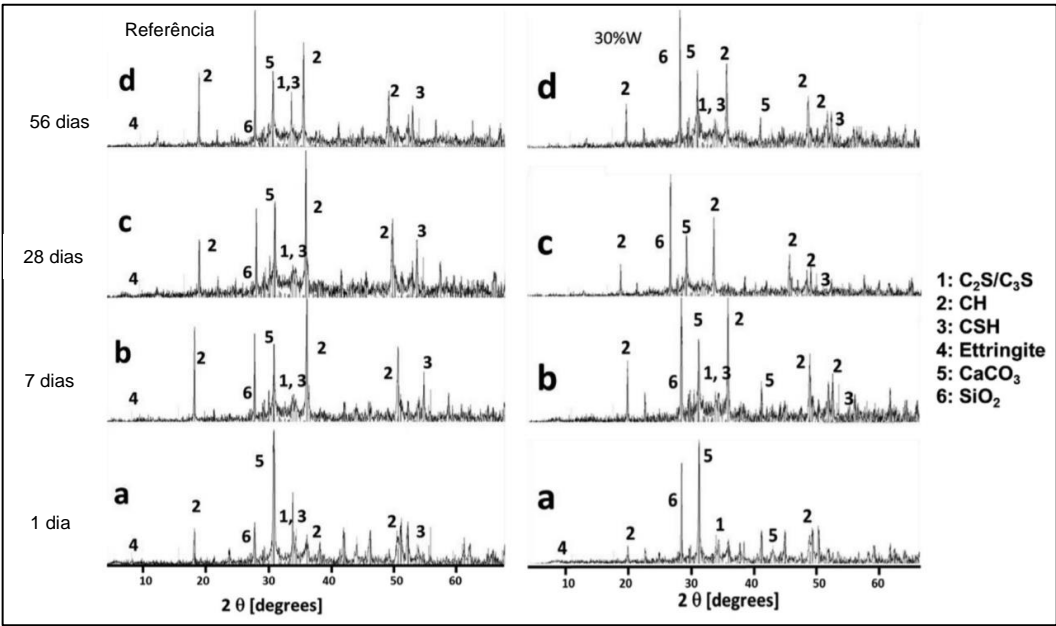
Fonte: A autora (2020)

Na composição química dos materiais cerâmicos, observa-se a presença de maiores quantidades de SiO₂ e Al₂O₃, onde a variação das proporções de sílica e alumina é de acordo com a argila utilizada. A principal diferença entre as cerâmicas brancas e vermelhas é a proporção de óxido de ferro (Fe₂O₃), responsável pela coloração avermelhada nos produtos (TORGAL; JALALI, 2011).

A utilização de resíduos de cerâmica em misturas cimentícias é estudada em substituição ao cimento ou aos agregados. Aqueles provenientes de louças sanitárias e louças de mesa como substitutos de agregados no concreto são capazes de melhorar a resistência à compressão das misturas (KESHAVARZ; MOSTOFINEJAD, 2019).

Lasseuguette *et al.* (2019) avaliaram a hidratação de argamassas com a incorporação de resíduos de cerâmica branca. A Figura 25 mostra a análise de difração de raios-X (DRX) encontrada pelos autores na argamassa de referência, sem adição de cerâmica, e quando a substituição, em massa, de cimento pelo resíduo foi de 30%.

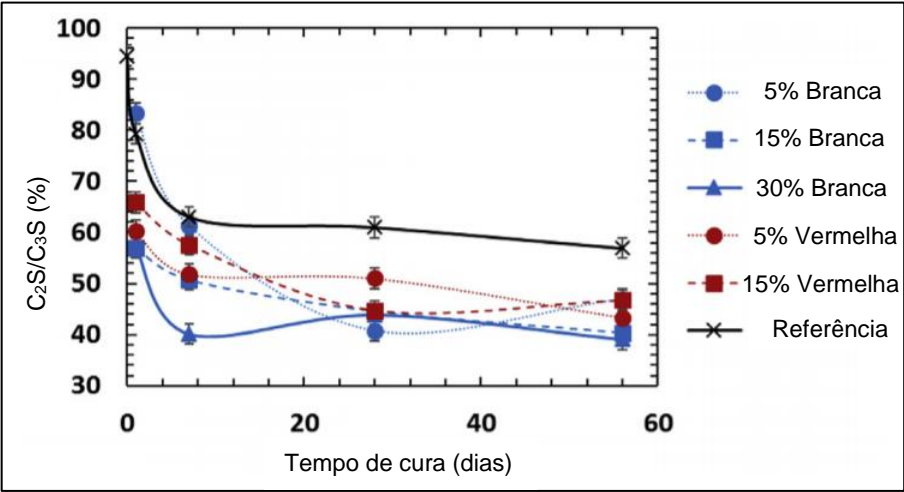
Figura 25 - DRX de argamassas com 30% de resíduo de cerâmica branca e argamassa sem resíduo, respectivamente, após 1 (a), 7 (b), 28 (c) e 56 (d) dias. 1) Silicato de cálcio, 2) Portlandita, 3) Silicato de cálcio hidratado, 4) Etringita, 5) Calcita e 6) Quartzo



Fonte: Adaptado de Lasseguette *et al.* (2019)

Conforme ocorre a cura das argamassas, observa-se a formação de produtos de hidratação como portlandita (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH), etringita e calcita (CaCO₃) (LASSEUGUETTE *et al.*, 2019). A Figura 26 ilustra o consumo de silicatos de cálcio (C₂S e C₃S) em função do tempo de cura em misturas com substituições de 5 a 30% de cimento, em massa, por resíduos de cerâmica branca, e de 5 e 15% por resíduos de cerâmica vermelha.

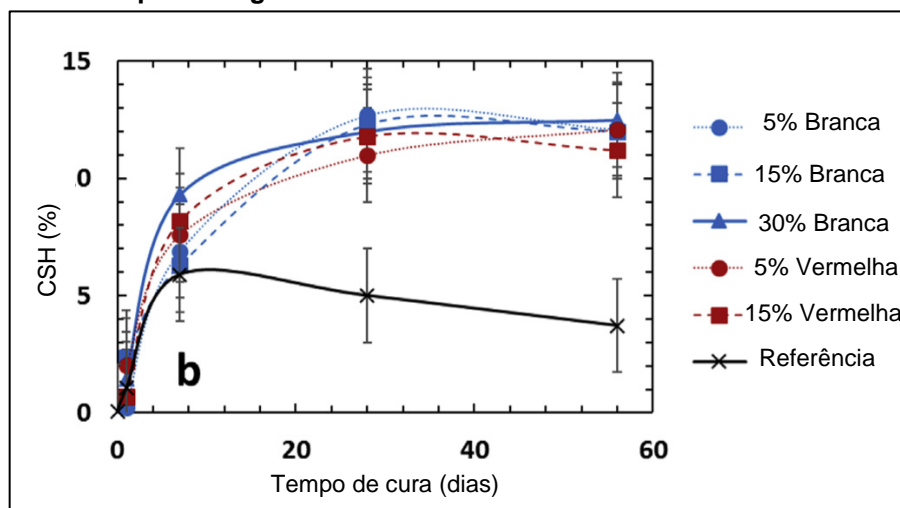
Figura 26 - Quantidade de silicatos de cálcio em função do tempo de cura e da porcentagem de resíduo de cerâmica nas misturas



Fonte: Adaptado de Lasseguette *et al.* (2019)

Em todas as misturas, a quantidade de silicatos de cálcio diminui no decorrer do tempo de cura, devido ao seu consumo durante a hidratação. Além disso, há um consumo significativo de silicatos de cálcio em todas as misturas com resíduos cerâmicos em até 10 dias de cura, demonstrando que as reações de hidratação são intensas nas idades iniciais. A Figura 27 mostra que após 1 dia de cura há uma quantidade significativa de produção de silicatos de cálcio hidratado (CSH), estando correlacionado ao consumo de silicatos de cálcio (C_2S e C_3S) (LASSEUGUETTE *et al.*, 2019).

Figura 27 - Quantidade de silicatos de cálcio hidratado (CSH) em função do tempo de cura e da porcentagem de resíduo de cerâmica nas misturas

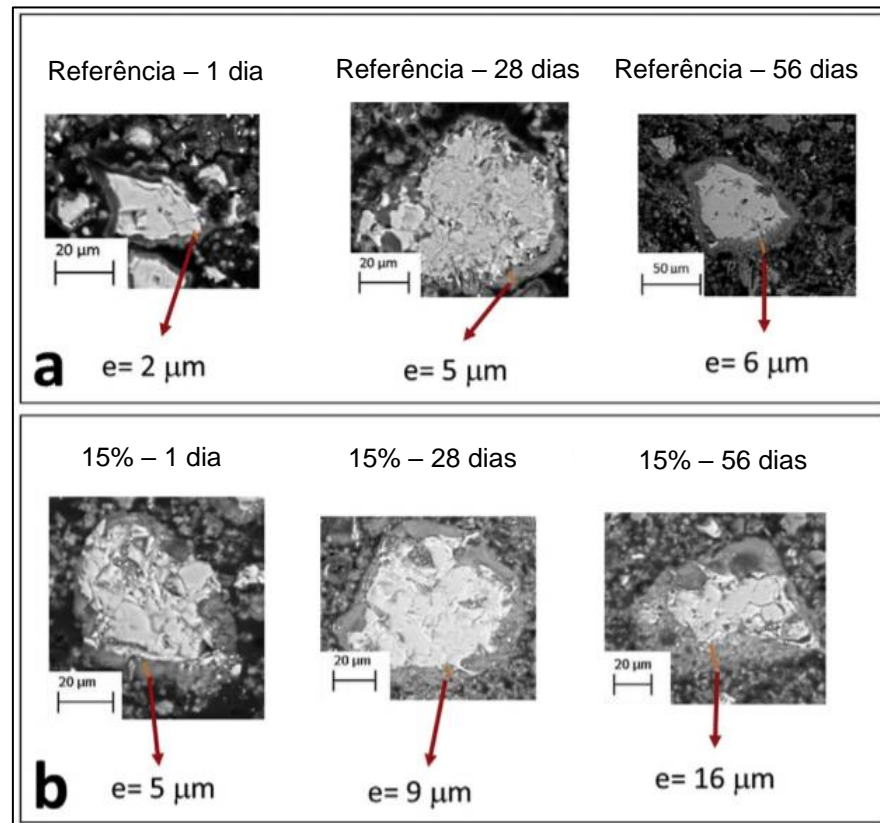


Fonte: Adaptado de Lasseuguette *et al.* (2019)

A Figura 28 apresenta um comparativo, através da análise da microestrutura, da formação de CSH da argamassa de controle, sem resíduos, e de uma argamassa produzida com substituição de 15%, em massa, de cimento por cerâmica branca após 1, 28 e 56 dias de cura (LASSEUGUETTE *et al.*, 2019).

Para as misturas produzidas com cerâmica branca, observa-se que após 1 dia de cura a espessura da camada de CSH é de 5 μm , chegando a 16 μm aos 56 dias, enquanto para as argamassas sem resíduo a espessura é de 6 μm após 56 dias, corroborando com os resultados obtidos por análise de difração de raios-X (DRX). Para as argamassas contendo cerâmica em substituição ao cimento Portland, a concentração de CSH está relacionada com o desenvolvimento da resistência à compressão, indicando que quanto mais CSH, maior será a resistência mecânica (LASSEUGUETTE *et al.*, 2019).

Figura 28 - Formação de CSH para uma argamassa sem resíduo (a) e uma argamassa com 15% de resíduo de cerâmica branca (b) após 1, 28 e 56 dias de cura

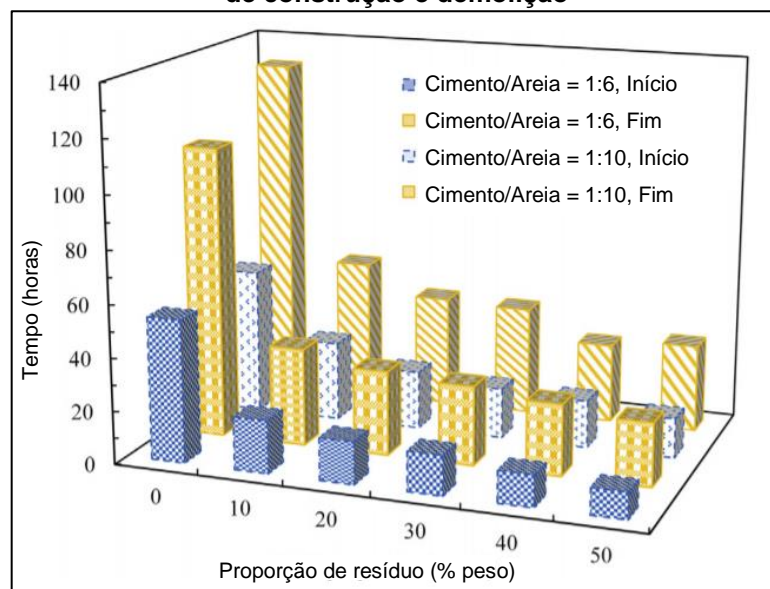


Fonte: Adaptado de Lasseuguette *et al.* (2019)

Chen *et al.* (2018) avaliaram a influência de resíduos de cerâmica provenientes de construção e demolição, constituídos de 33,77% de SiO_2 e 17,21% de Al_2O_3 , na trabalhabilidade de misturas cimentícias utilizadas como aterros em minas (“*Cemented Paste Backfill*”) e concluíram que a proporção destes resíduos afetou de forma positiva a trabalhabilidade das misturas, devido à baixa absorção de água do resíduo.

Além disso, observaram que os tempos de início e fim de pega diminuem conforme a proporção de resíduo aumenta, devido à presença de SiO_2 e Al_2O_3 , conforme ilustrado no gráfico da Figura 29, que indica a proporção de resíduos de construção e demolição no eixo das abcissas (0 a 50%) e o tempo de pega no eixo das ordenadas, para misturas com proporções de cimento e areia de 1:6 e 1:10.

Figura 29 - Tempos de início e fim de pega de misturas com diferentes proporções de resíduo de construção e demolição



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2018)

2.5 FORMULAÇÃO DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES

Não há um consenso sobre os efeitos das ações combinadas que afetam os parâmetros de desempenho das pastas cimentícias autonivelantes. No entanto, estas devem atender alguns critérios no estado fresco e endurecido. Para isso, os componentes da estrutura granular da mistura devem ser cuidadosamente selecionados, entre eles o cimento, materiais de natureza pozolânica ou inerte e misturas químicas, a fim de considerar a morfologia das superfícies, finura, tamanho das partículas, distribuição e interações físico-químicas, como reações de hidratação (FELEKOGLU *et al.*, 2006).

A Tabela 3 apresenta dosagens de argamassas autonivelantes adotadas por alguns autores. Observa-se que a relação água/cimento possui valores entre 0,33 e 0,70, a quantidade de aditivo superplastificante, em relação à massa de materiais cimentícios, varia de 0,25 a 1,50% e de aditivo modificador de viscosidade entre 0 e 1,00%. Além disso, dois diferentes tipos de cimentos são predominantes em argamassas autonivelantes: CP II Z-32 e CP V ARI.

Tabela 3 - Dosagens de argamassas autonivelantes elaboradas por alguns autores

Proporção dos materiais	Massa ou Volume	Relação Água/cimento	Aditivo Superplastificante	Aditivo Modificador de Viscosidade	Resíduo utilizado	Tipo de cimento	MF areia	Autor
Cimento:Areia:Resíduo								
01:02:00	Massa	0,70	0,50% (Policarboxilato)	0,90%	Argamassa de Referência (sem resíduo)	CP V ARI		Pereira; Camarini (2018)
0,5:2:0,5	Massa	0,70	0,50% (Policarboxilato)	0,90%	Isoladores de porcelana	CP V ARI		Pereira; Camarini (2018)
01:01:00	Massa	0,33	0,33% (Policarboxilato)	0,67%	Argamassa de Referência (sem resíduo)	CP II Z-32 e CP V ARI-RS	1,24	Mendes (2019)
01:1,5:0,4	Massa	0,50	0,50% (Policarboxilato)	1,00%	RCMG (Resíduo do corte de mármore e graníticos)	CP II Z-32 e CP V ARI-RS	1,24	Mendes (2019)
01:02:00	Volume	0,50	0,40% (Policarboxilato)	0,00%	Argamassa de Referência (sem resíduo)	CP V ARI	1,39	Carvalho (2015)
0,9:2:0,1	Volume	0,50	0,25% (Policarboxilato)	0,00%	Fíler Calcário	CP V ARI	1,39	Carvalho (2015)
1:1,25:0,05	Massa	0,51	0,40% (Policarboxilato)	0,75%	Cinza Volante	CP V ARI	2,4	Silva (2016)
01:03:00	Massa	0,50	1,00% (Policarboxilato)	0,70%	Argamassa de Referência (sem resíduo)	CP V ARI		Katsiadramis; Sotiropoulou; Pandermarakis (2010)
01:02:00	Volume	0,50	0 a 1,5% (Policarboxilato)	0,00%	Argamassa de Referência (sem resíduo)	CP V ARI		Canbaz; Topçu; Atesin (2016)

Fonte: Adaptado pela autora (2021)

2.6 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

2.6.1 Propriedades no estado fresco

Pileggi, Cincotto e John (2006) explicam que as argamassas são misturas formadas principalmente por agregado miúdo, finos reativos e teor suficiente de água, podendo, ainda, incorporar finos inertes, aditivos químicos e fibras. Como o efeito da composição interfere na qualidade do produto, este deve ser controlado no momento da produção, ao invés de aguardar os resultados dos ensaios das propriedades no estado endurecido.

Além disso, a análise das propriedades das misturas autonivelantes no estado fresco garante o atendimento às propriedades exigidas do produto no estado endurecido. As propriedades necessárias das argamassas no estado fresco são: alta fluidez, estabilidade dimensional, resistência à segregação e à exsudação e capacidade autonivelante, sem a necessidade de utilizar adensamento manual ou mecânico (SILVA, 2016).

2.6.1.1 Trabalhabilidade

A definição adequada de trabalhabilidade possibilita testes de controle bem fundamentados e planejados (BANFILL, 1994). Trabalhabilidade é a propriedade que define a facilidade de mistura, transporte, aplicação, consolidação e acabamento, de forma homogênea. Uma argamassa é intitulada “trabalhável” quando permite a execução do revestimento com produtividade, garantindo boa aderência à superfície e acabamento superficial (CARASEK, 2007).

No entanto, argamassas autonivelantes, assim como outros compósitos cimentícios, apresentam relação inversa entre trabalhabilidade e propriedades mecânicas, pois requerem uma alta relação água/cimento, dificultando a obtenção de uma mistura fluída, sem segregação e com boa resistência mecânica (PEREIRA; CAMARINI, 2018). De acordo com Silva (2016), a fluidez da mistura autonivelante está diretamente relacionada com a adição do aditivo superplastificante, pois este promove a dispersão das partículas, resultando no afastamento delas. No entanto, este aditivo deve ser adequadamente dosado, pois caso contrário ocorrerá

segregação da mistura e exsudação da água, ocasionado pela perda de equilíbrio da macroestrutura, devido ao excessivo afastamento dos grãos.

2.6.1.2 Segregação e exsudação

A resistência à segregação é definida como a capacidade de manter a mistura homogênea, através da não separação das partículas, que ocorre devido à elevada fluidez e a exsudação é um fenômeno que ocorre em compósitos cimentícios devido à água possuir a menor massa específica entre todos os materiais componentes da mistura, fazendo com que a água se desloque até a superfície (MARTINS, 2009; CARVALHO, 2015).

Os efeitos causados pela perda de água por exsudação e pela segregação podem ser reduzidos com o emprego de aditivos modificadores de viscosidade. Estes aditivos melhoram a coesão no estado fresco, pois aumentam a viscosidade da mistura (SILVA, 2016).

2.6.1.3 Retenção de água

A propriedade associada à capacidade da mistura de se manter trabalhável quando sujeita à perda de água de amassamento por evaporação ou absorção de água da superfície é a retenção de água. Esta propriedade influencia no desempenho da argamassa tanto no estado fresco quanto no endurecido, pois uma adequada retenção de água possibilita as reações químicas de endurecimento, refletindo na aderência, resistência mecânica e durabilidade das argamassas (CARASEK, 2007). A presença de materiais finos na dosagem de argamassas autonivelantes pode contribuir na retenção da água da mistura (SILVA, 2016).

2.6.2 Propriedades no estado endurecido

2.6.2.1 Resistência mecânica

As especificações de resistências mecânicas requeridas às argamassas autonivelantes para contrapiso exigem, usualmente, valores de resistência à compressão entre 25 e 35 MPa aos 28 dias e de resistência à tração na flexão entre

8 e 11 MPa, variando conforme a função que a camada desempenha no piso (NAKAKURA; BUCHER, 1997).

2.6.2.2 Aderência

A aderência, conforme definição da NBR 13528 (ABNT, 2019) trata-se da propriedade do revestimento de resistir às tensões atuantes na superfície ou na interface com o substrato. A resistência de aderência à tração é definida como a tensão máxima suportada por uma área limitada de revestimento na interface do substrato, quando submetida a um esforço ortogonal de tração. Carasek (2007) explica que esta propriedade define a interação entre o substrato e a argamassa.

A determinação da resistência ao arrancamento por tração é utilizada para avaliar se o piso funcionará como um sistema monolítico, tendo em vista que esta camada é incorporada à laje, devendo permanecer unida a ela (NAKAKURA; BUCHER, 1997).

Não há norma específica que estabeleça limites de resistência ao arrancamento por tração para argamassas autonivelantes. No entanto, a NBR 13749 (ABNT, 2013) apresenta os limites de resistência de aderência à tração de revestimentos de paredes e teto, conforme mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Limites de resistência de aderência à tração de revestimentos de paredes e teto

Local		Acabamento	Resistência de aderência (MPa)
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	≥ 0,20
		Cerâmica ou laminado	≥ 0,30
	Externa	Pintura ou base para reboco	≥ 0,30
		Cerâmica	≥ 0,30
Teto			≥ 0,20

Fonte: Adaptado de NBR 13749 (ABNT, 2013)

2.6.2.3 Retração

A retração é a propriedade associada à variação de volume da mistura. Esta propriedade é fundamental em argamassas, pois determina a capacidade de estanqueidade e durabilidade (CARASEK, 2007). Trata-se da deformação do material

sem que haja solicitações mecânicas externas. São influenciadas pela qualidade da microestrutura e o avanço nas reações de hidratação do cimento, apresentando relação direta com a resistência à compressão (ITIM; EZZIANE; KADRI, 2011). Em argamassas autonivelantes, a retração está relacionada às reações químicas de hidratação do cimento, tensão superficial da água e variações de volume do estado plástico para o endurecido (ONISHI; BIER, 2010).

A retração por secagem do material para contrapiso autonivelante, assim como em argamassas comuns e concretos, é medida em prismas, através da redução de comprimento, em um ambiente de ar seco e durante determinado intervalo de tempo, geralmente na idade de 3 ou 24 horas, dependendo da velocidade de endurecimento do cimento. As especificações técnicas citam três limites máximos de retração por secagem: 0,03% para material sobre qualquer substrato, 0,05% para argamassas sobre concreto pouco absorvente e utilizando uma ponte de aderência polimérica e de 0,08% para aplicação em bases não absorventes, com ponte de aderência e análise rigorosa para evitar a fissuração (NAKAKURA; BUCHER, 1997).

A substituição adequada de adições minerais nas misturas diminui a retração por secagem e, conseqüentemente, aumenta a resistência à compressão, resultando na melhoria do desempenho da microestrutura (ITIM; EZZIANE; KADRI, 2011).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo estão detalhadas as atividades executadas para atingir os objetivos do estudo. As etapas empregadas para o desenvolvimento do procedimento experimental da presente pesquisa estão resumidas no fluxograma da Figura 30.

Este trabalho busca dar continuidade aos estudos de Mendes (2019), que desenvolveu uma formulação para argamassas autonivelantes. Para isto, foi proposto o desenvolvimento de argamassas autonivelantes utilizando dois resíduos separadamente: o fosfogesso, em sua forma natural e calcinada, e a cerâmica branca.

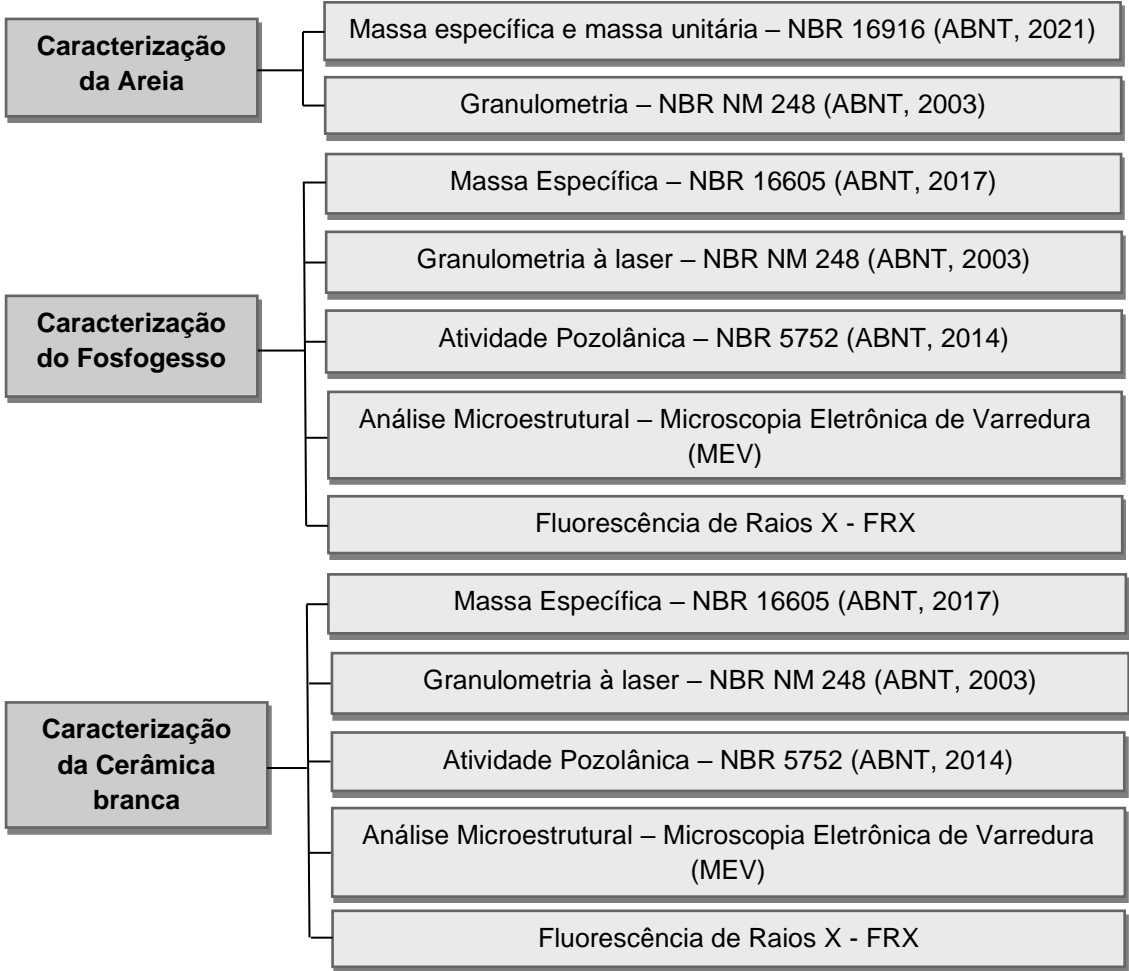
Figura 30 - Fluxograma resumido do planejamento experimental



Fonte: A autora (2021)

O procedimento experimental iniciou na etapa de caracterização dos materiais utilizados nas argamassas autonivelantes: areia, fosfogesso e cerâmica branca. Os ensaios realizados para caracterização destes materiais estão listados na Figura 31.

Figura 31 – Fluxograma dos ensaios de caracterização dos materiais



Fonte: A autora (2021)

Após a etapa de caracterização dos materiais, efetuou-se a dosagem e preparação das misturas, utilizando como traço de referência o proposto por Mendes (2019), e realizando os ajustes necessários à adequação deste com os resíduos utilizados. Foram analisadas quatro misturas de argamassas autonivelantes, conforme listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dosagem de argamassas elaboradas

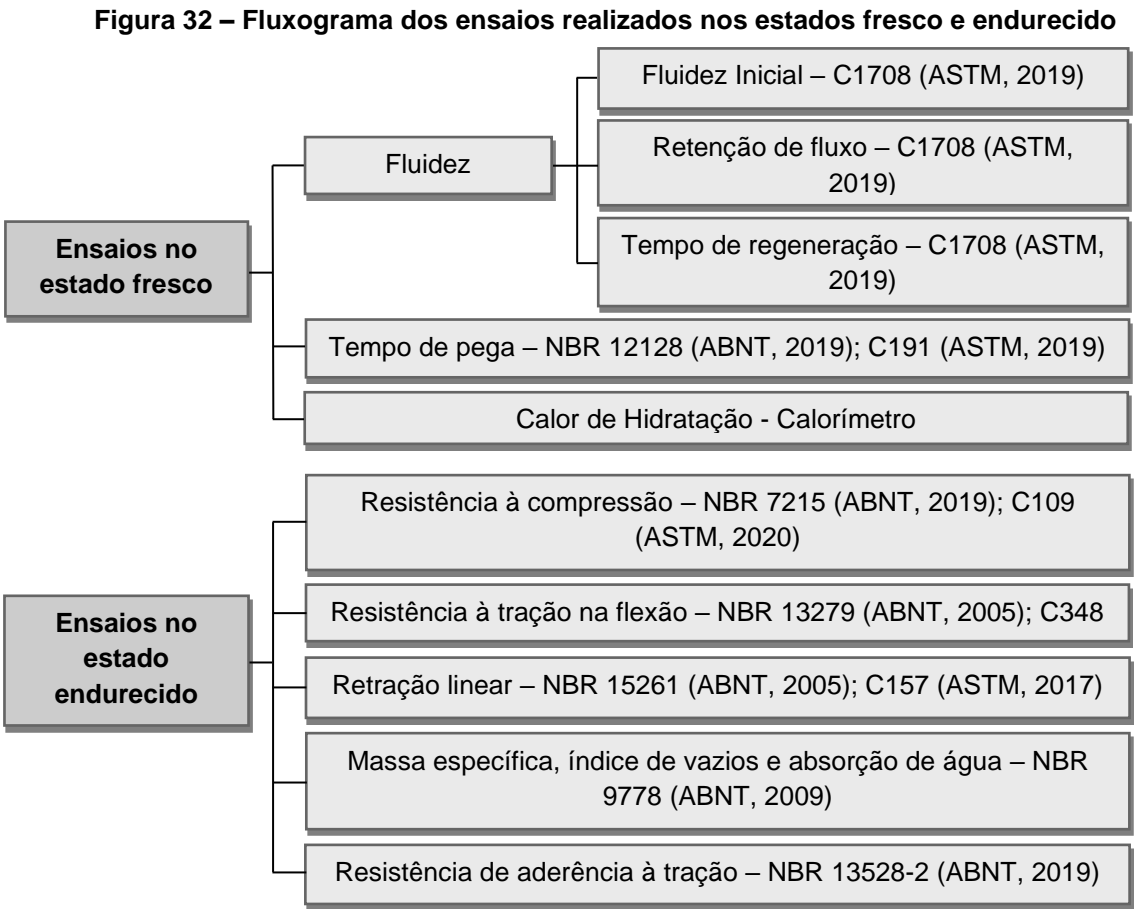
Nome	Descrição
AR	Argamassa de Referência
FN	Substituição de 50% da massa de cimento CP II Z-32 por fosfogesso natural
FC	Substituição de 50% da massa de cimento CP II Z-32 por fosfogesso calcinado
CB	Substituição de 50% da massa de cimento CP II Z-32 por cerâmica branca

Fonte: A autora (2021)

A seleção da proporção das misturas visa a produção de argamassas autonivelantes que satisfaçam as propriedades requeridas utilizando resíduos industriais de fosfogesso natural, fosfogesso calcinado e cerâmica branca, individualmente, que foram incorporados através de substituições parciais de 50% da massa de cimento Portland.

Esta porcentagem de substituição do cimento Portland pelos resíduos deve-se à continuidade dos estudos de Mendes (2019), tendo em vista que a autora estudou argamassas com a mesma porcentagem de substituição utilizando resíduos do corte de mármore e graníticos (RCMG). Desta forma, há possibilidade de complementação dos trabalhos através de futura comparação entre os resultados das propriedades avaliadas e as características dos resíduos utilizados.

Para avaliar a influência do fosfogesso natural, do fosfogesso calcinado e da cerâmica branca no desempenho das argamassas autonivelantes, foram realizados ensaios nos estados fresco e endurecido, conforme relacionados no fluxograma da Figura 32.



Fonte: A autora (2021)

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a confecção das argamassas autonivelantes foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CP II Z-32, areia fina, água e aditivos superplastificante e modificador de viscosidade. Os resíduos utilizados nas argamassas através de substituições parciais do cimento, em massa, foram o fosfogesso natural e calcinado e a cerâmica branca.

3.1.1 Cimento

Para a confecção das argamassas utilizou-se o cimento Portland CP II Z-32 da marca Votorantim, comercialmente denominado de “Cimento Todas as Obras”, por ter ampla utilização e ser facilmente adquirido na região de Joinville/SC.

Este tipo de cimento possui a composição de 0-10% de fíler calcário, 76-94% de clínquer e gesso e entre 6-14% de pozolana, tempo de início de pega ≥ 1 hora e de fim de pega ≤ 10 horas, e resistência à compressão ≥ 10 MPa aos 3 dias, ≥ 20 MPa aos 7 dias e ≥ 32 MPa aos 28 dias (BATTAGIN, 2011).

A composição química e massa específica do cimento CP II Z-32 está resumida na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química do cimento CP II Z-32

Material	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Massa específica (g/cm ³)
	%	%	%	%	%	%	
CP II Z-32	8,65	20,64	3,25	51,52	4,25	2,51	2,92

Fonte: Itambé (2020)

3.1.2 Agregado miúdo

A areia utilizada no estudo foi obtida na empresa Mineradora Veiga, situada na cidade de Araquari/SC. Trata-se de areia fina, natural de cava, denominada comercialmente de Areia MF 60/70 AFS, conforme Figura 33. Para aplicação nas misturas, o material foi previamente seco em estufa durante 48 horas à temperatura de 100 ± 2 °C.

Figura 33 - Areia MF 60/70 AFS obtida da Mineradora Veiga



Fonte: A autora (2021)

3.1.3 Água

Para a produção das argamassas, utilizou-se água em quantidades definidas nas misturas elaboradas, em temperatura ambiente, fornecida pela Companhia de Águas de Joinville, com pH entre 6,2 e 6,8, segundo dados da concessionária local.

3.1.4 Aditivos

A fim de melhorar as propriedades necessárias às argamassas autonivelantes, como fluidez e viscosidade, foram utilizados os aditivos superplastificante e modificador de viscosidade.

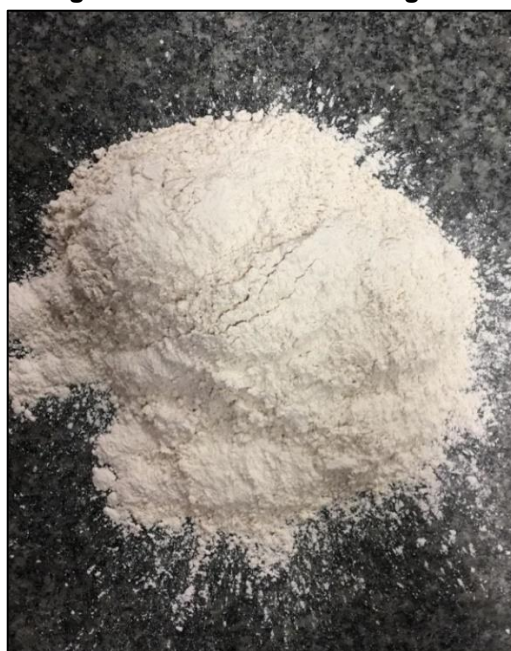
O aditivo modificador de viscosidade utilizado foi o Centrament Stabi 520, fornecido pela empresa MC Bauchemie. Conforme dados do fabricante, trata-se de um produto para estabilização de misturas de alta trabalhabilidade, através das reduções das forças de atrito internas, aumentando a homogeneidade e reduzindo a sedimentação, exsudação e perda de água. A densidade do aditivo é de 1,00 g/cm³ e a dosagem recomendada varia entre 0,1 a 1,5% da massa de cimento. O fabricante informou que se trata de um estabilizador orgânico, sem especificar a composição química.

O aditivo superplastificante adotado foi o MC-PowerFlow 4000, também fornecido pela MC Bauchemie. De acordo com o fabricante, trata-se de um superplastificante sintético baseado na nova tecnologia de polímeros policarboxilatos, com dosagem de 0,2 a 5% da massa de cimento e densidade de 1,12 g/cm³.

3.1.5 Resíduo de fosfogesso

O fosfogesso foi obtido da empresa AgroAdubo, que comercializa o resíduo para a agricultura, como condicionador de solo, recebendo a denominação de gesso agrícola. O material foi inicialmente seco em estufa durante 24 horas à temperatura de 100 ± 2 °C. A Figura 34 ilustra o material obtido.

Figura 34 - Resíduo de fosfogesso



Fonte: A autora (2021)

Para sua utilização como possível material pozolânico, o material foi peneirado até que a quantidade de material retido na peneira de malha 45 μm fosse inferior a 20% da massa total da amostra utilizada nos ensaios, conforme descrito na NBR 12653 (ABNT, 2014). O fosfogesso natural seco à temperatura de 100 ± 2 °C, sem tratamento, foi denominado de fosfogesso natural (FN).

Para os ensaios das propriedades físicas e mecânicas das argamassas, foi utilizado também o fosfogesso calcinado à temperatura de 450 °C durante o período de 4 horas, que resulta na forma de sulfato de cálcio anidrita II (CaSO_4), conhecido por fosfoanidrita, a fim de melhorar as propriedades das argamassas, conforme observado por Schaefer, Cheriaf e Rocha (2017). No presente estudo, este material foi denominado fosfogesso calcinado (FC).

A calcinação do fosfogesso de acordo com a temperatura e o período acima descritos foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do Programa de

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da UDESC, em Joinville/SC, utilizando um forno com alta capacidade de aquecimento, conforme Figura 35.

Figura 35 - Forno utilizado na calcinação do fosfogesso



Fonte: A autora (2021)

3.1.6 Resíduo de cerâmica branca

O resíduo de cerâmica branca foi disponibilizado pela empresa Oxford Porcelanas, situada na cidade de São Bento do Sul/SC. Trata-se de materiais quebrados durante o processo de fabricação de louças de mesa, sem a camada vítrea transparente e incolor, obtidos após a etapa de queima do biscoito, conforme mostrado na Figura 36 a).

Para utilização do resíduo nas misturas, foi necessário fazer sua moagem utilizando o moinho de bolas da Servitech, modelo CT-241, com esferas em alumina, disponibilizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UDESC, em Joinville/SC, através de ciclos de moagem de 50 minutos, até que a quantidade de material retido na peneira de malha 45 μm fosse inferior a 20% da massa total da amostra. O material obtido após a moagem está ilustrado na Figura 36 b).

Para ser utilizado nas misturas, o material foi seco em estufa durante 24 horas à temperatura de $100 \pm 2^\circ\text{C}$.

Figura 36 - a) Resíduos de cerâmica branca obtidos da empresa Oxford Porcelanas; b) Resíduo de cerâmica após a moagem e peneiramento



Fonte: A autora (2021)

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo estão descritos os ensaios utilizados para caracterizar a areia e os resíduos de fosfogesso natural, fosfogesso calcinado e cerâmica branca.

3.2.1 Granulometria da areia

A análise granulométrica da areia pelo ensaio de peneiramento seguiu os procedimentos descritos na NBR NM 48 (ABNT, 2003). Com a realização deste ensaio obteve-se a distribuição granulométrica, o diâmetro máximo do agregado miúdo e o módulo de finura.

Utilizou-se o conjunto de peneiras da série normal, com aberturas de malha de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm. Segundo a norma, a massa mínima de cada amostra para o ensaio é de 300 gramas de agregado miúdo seco em estufa, sendo necessárias 2 amostras.

As peneiras foram dispostas com abertura da malha em ordem crescente da base para o topo, e a amostra foi colocada na peneira superior do conjunto. O peneiramento foi feito manualmente e de forma contínua, através de movimentos

laterais e circulares, permitindo a classificação dos diferentes tamanhos de grãos. A determinação das massas retidas em cada peneira foi realizada de forma que, após 1 minuto de peneiramento contínuo, a massa de material passante fosse inferior a 1% da massa de material retido.

Determinou-se a massa de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. Os valores de porcentagem retida em cada uma das peneiras não variou mais de 4% entre as 2 amostras avaliadas e, ao final, a soma de todas as massas não foi maior que 0,3% da massa inicial total.

3.2.2 Granulometria do fosfogesso e da cerâmica branca

O ensaio de granulometria à laser do fosfogesso natural e da cerâmica branca foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da UDESC, em Joinville/SC.

Para este ensaio, as amostras foram dispersas em uma solução de hexametáfosfato de sódio na relação de 0,5 gramas de material para 20 ml de fluído. Após isto, os materiais foram misturados no agitador de partículas durante 15 minutos, para homogeneização da mistura.

A distribuição granulométrica foi determinada através do equipamento analisador de tamanho de partículas à laser da fabricante Shimadzu – modelo SALD 2201, conforme Figura 37.

Figura 37 - Equipamento analisador de tamanho de partículas a laser



Fonte: A autora (2021)

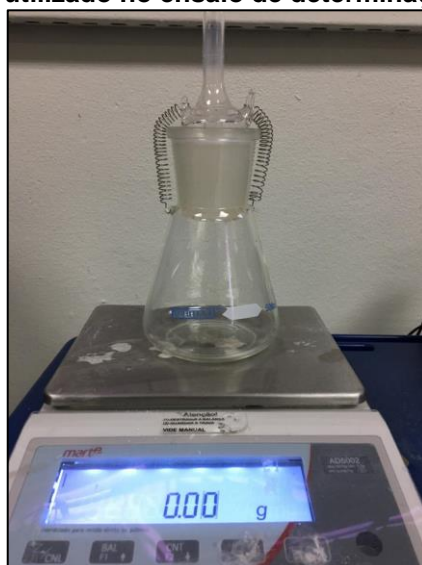
3.2.3 Determinação da massa específica e massa unitária da areia

A massa específica e unitária da areia foram determinadas em conformidade com a NBR 16916 (ABNT, 2021). Para a realização do ensaio, a areia foi disposta em um recipiente e coberta com água, ficando em repouso durante 24 horas. Após este período, foi retirado o excesso de água da amostra, estendendo-a sobre uma superfície com corrente de ar contínua e misturando-a com frequência para obter uma secagem uniforme.

Procedeu-se a secagem do material até o agregado atingir a condição ideal para o ensaio, que é denominada de saturado superfície seca. Este ponto é atingido quando o agregado desmorona parcialmente após a amostra ser colocada em um molde tronco-cônico e compactada com 25 golpes de haste distribuídos uniformemente.

Assegurada a condição ideal do agregado para o ensaio, foram colocadas 500 gramas da amostra no frasco calibrado (picnômetro), com capacidade para 500 cm³, registrando a massa do conjunto frasco + areia. Após este procedimento, o frasco foi preenchido com água até a marca de 500 ml, realizando movimentos circulares para eliminar as bolhas de ar presentes. Em seguida, o conjunto foi colocado em repouso em um banho à temperatura constante de 21°C, durante 1 hora. Decorrido este tempo, o picnômetro foi completado com água até a marca de 500 cm³, registrando a massa total do conjunto frasco + areia + água, conforme Figura 38.

Figura 38 - Picnômetro utilizado no ensaio de determinação da massa específica



Fonte: A autora (2021)

de 18 e 24 cm³, realizando movimentos circulares com o frasco para eliminar as bolhas de ar, conforme Figura 39 b).

Após isto, foi registrada a leitura do volume na escala graduada. A massa específica do material foi determinada através da Equação 2:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Onde, ρ é a massa específica do resíduo (g/cm³), m é a massa do material ensaiado (g) e V é o volume deslocado pelo material (cm³).

3.2.5 Determinação do índice de atividade pozolânica

A determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias dos resíduos de fosfogesso natural e cerâmica branca foi realizado conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014). Inicialmente, os resíduos foram secos em estufa à temperatura de 100 ± 2 °C durante 48 horas e moídos até que o resíduo na peneira com abertura de malha de 45 µm fosse inferior a 20%, preferencialmente entre 10 e 15%.

Para a execução do ensaio, foram preparadas três argamassas com dosagens diferentes: a argamassa A, contendo cimento CP II-F-32, areia normal e água e as argamassas B, uma contendo 25% em massa de fosfogesso em substituição à massa de cimento e outra contendo 25% em massa de cerâmica branca em substituição à massa de cimento. Para cada dosagem, foram preparados 6 corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm, conforme mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Corpos de prova para determinação da atividade pozolânica



Fonte: A autora (2021)

A areia normal foi utilizada conforme determina a NBR 7215 (ABNT, 2019), através da mistura de quatro frações de granulometrias diferentes, conforme demonstrado na Figura 41.

Figura 41 - Frações de areia utilizadas no ensaio de atividade pozolânica



Fonte: A autora (2021)

Após o período inicial de cura, os corpos de prova foram desmoldados e levados à cura úmida até completarem 28 dias, quando foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão. A atividade pozolânica foi determinada através da relação entre a resistência a compressão da argamassa com o resíduo e da argamassa de referência, conforme Equação 3:

$$Icimento = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad (3)$$

Onde, *Icimento* é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%), f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25% de material pozolânico (MPa) e f_{cA} é a resistência média aos 28 dias das argamassas moldadas apenas com cimento CP II-F-32 (MPa).

A NBR 12653 (ABNT, 2015) classifica como material pozolânico àqueles que atingirem três requisitos, são eles: índice de atividade pozolânica com cimento (*Icimento*) aos 28 dias maior ou igual a 90%, quantidade de material retido na peneira de malha de 45 µm menor que 20% em peso e possuir em sua composição química uma concentração total de sílica, alumina e óxido de ferro maior que 70%. Além disso, a concentração de SO₃ deve ser menor que 4%.

3.2.6 Análise da fluorescência de raios X - FRX

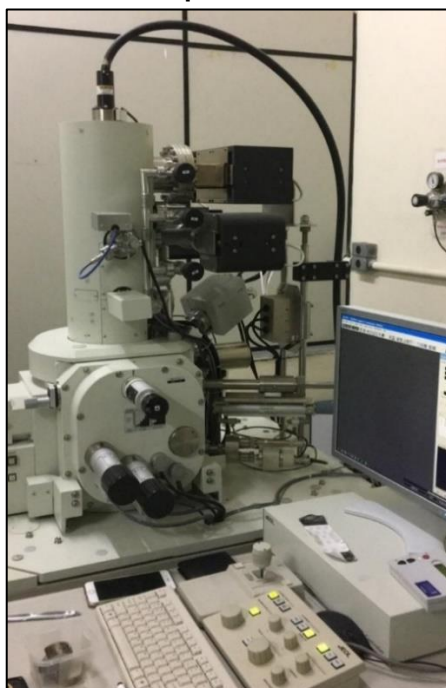
A análise química das amostras de fosfogesso natural, fosfogesso calcinado e cerâmica branca foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da UDESC, em Joinville/SC. Para o ensaio, utilizou-se um espectrômetro de fluorescência de raios-X com energia dispersiva, resultando na determinação da quantidade de elementos químicos presentes nas amostras. O equipamento utilizado é de fabricação da SHIMADZU.

3.2.7 Análise microestrutural - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise microestrutural dos resíduos de fosfogesso natural e cerâmica branca foi realizada por meio de imagens obtidas utilizando o microscópio eletrônico de varredura modelo Field Emission JSM-6701F associado a um Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS), também no Laboratório de Caracterização de Materiais, conforme ilustrado na Figura 42.

As amostras dos resíduos em pó foram inseridas em uma fita de carbono e recobertas com ouro, a fim de melhorar a condução no equipamento.

Figura 42 - Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: A autora (2021)

3.3 PREPARO DAS ARGAMASSAS

A proporção dos materiais adotada para o preparo das argamassas foi obtida de Mendes (2019), que validou diferentes dosagens de argamassas através de dois critérios: diâmetro mínimo de espalhamento de 125 mm, conforme recomendado na norma americana C1708 (ASTM, 2019), e ausência de segregação. Com isso, a autora obteve o traço de referência com as seguintes proporções: 1:1:0,33:0,0033:0,0067, respectivamente cimento, areia, água, aditivo superplastificante e aditivo modificador de viscosidade.

Com a adição do resíduo de corte de mármore e graníticos (RCMG), foi obtida a proporção dos materiais 1:1,5:0,50:0,55:0,005:0,01 (cimento, areia, resíduo, água, aditivo superplastificante e aditivo modificador de viscosidade), substituindo 50% da massa de cimento, resultando em um diâmetro de espalhamento de 140 mm.

Neste trabalho, as argamassas foram produzidas com materiais semelhantes aos utilizados por Mendes (2019), como mesmo tipo e marca de cimento e areia. No entanto, foram realizados ensaios preliminares para ajustar as proporções dos resíduos adotados nesta pesquisa ao traço de referência, a fim de atingir os mesmos critérios de seleção: espalhamento mínimo de 125 mm e ausência de segregação.

O preparo das misturas foi realizado com base na NBR 16541 (ABNT, 2016), porém, foram necessárias algumas adequações, tendo em vista que a norma se refere ao preparo de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Não existe, até o momento, nenhuma norma brasileira que regulamente o procedimento de mistura de argamassas autonivelantes. A NBR 16765 (ABNT, 2019) trata somente da mistura de contrapisos autonivelantes comercializados em pó.

A argamassa foi preparada em um misturador mecânico, como indicado na Figura 43, dotado de cuba de aço inoxidável e pá de metal, com a capacidade de girar em torno de si mesma e desenvolver um movimento planetário em torno do eixo da cuba, com capacidade de 5dm³ e duas opções de velocidade: baixa e alta, conforme NBR 7215 (ABNT, 2019).

Figura 43 - Misturador mecânico utilizado no preparo das argamassas autonivelantes



Fonte: A autora (2021)

Para a preparação das argamassas, inicialmente foram umedecidos o recipiente e a pá do misturador mecânico e pesados todos os materiais a serem utilizados, com aproximação de 1,0 g. Após isto, foram inseridos na cuba as quantidades descritas no traço de areia, cimento, resíduo e 75% da quantidade total de água da mistura, procedendo a mistura destes materiais em velocidade baixa durante 20 segundos. Em seguida, foi acrescentada a quantidade restante de água e os aditivos, misturando por mais 10 segundos em velocidade baixa e 60 segundos em velocidade alta. Após este tempo, o misturador foi desligado durante 90 segundos, e com o auxílio de uma espátula realizou-se a raspagem da argamassa aderida à cuba e à pá, para que esta fosse homogeneizada. Nos segundos restantes, a argamassa permaneceu em repouso. Finalizado este intervalo, o misturador foi acionado na velocidade baixa por mais 60 segundos, completando a preparação das misturas autonivelantes.

3.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Os ensaios das argamassas autonivelantes no estado fresco foram realizados com base em propriedades que possam garantir melhor desempenho e produtividade. Foram avaliadas a fluidez, tempo de pega e calor de hidratação das misturas.

Tendo em vista a ausência de normatização brasileira para determinação das propriedades de fluidez destas argamassas, foi utilizada a norma C1708 (ASTM, 2019). Para avaliar a capacidade de escoamento, a norma determina três ensaios, que serão descritos a seguir: fluidez inicial, retenção de fluxo e tempo de regeneração.

3.4.1 Fluidez inicial

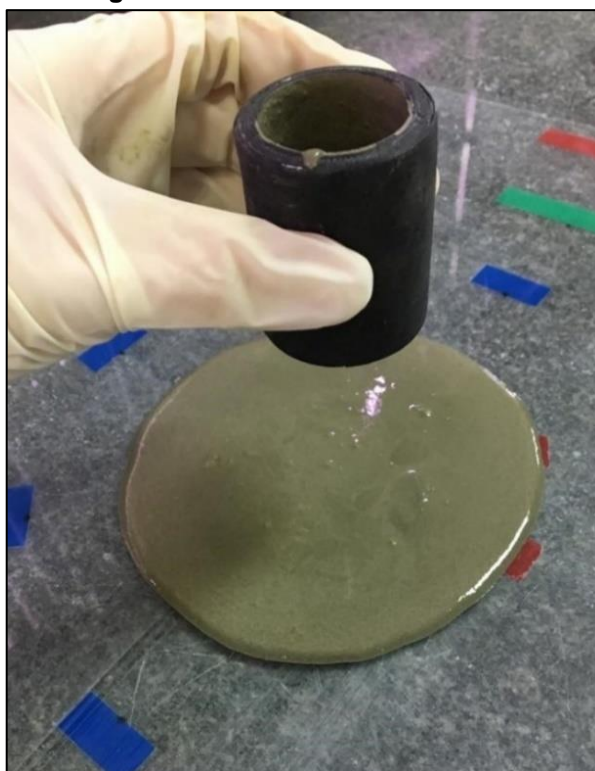
A execução deste ensaio foi realizada de acordo com a norma C1708 (ASTM, 2019), que trata de um método para determinar o escoamento da argamassa autonivelante recém preparada. O escoamento inicial de uma argamassa autonivelante define a sua capacidade de espalhamento, sendo essencial estabelecer uma faixa de fluxo aceitável para o seu uso adequado. Se este for muito baixo, a argamassa não será autonivelante, e caso seja muito elevado, algumas propriedades poderão ser comprometidas.

O ensaio consiste em colocar um anel de escoamento, que é um cilindro com dimensões de 30 mm de diâmetro e 50 mm de altura, sobre uma placa de vidro retangular, com dimensões mínimas de 400 mm e espessura de 6 mm, em uma superfície horizontal. Decorridos 30 s da preparação da mistura, o anel de escoamento foi preenchido com o material e, imediatamente após, levantado na direção vertical a uma altura entre 50 e 100 mm, permitindo o espalhamento da argamassa na placa de vidro.

O cronômetro foi acionado no momento que o anel foi levantado e a argamassa espalhou-se durante 240 ± 10 s. Após este procedimento, o diâmetro de espalhamento das argamassas nas duas direções foi registrado. O diâmetro médio de espalhamento representa o escoamento inicial, e deve ser um valor entre 125 e 150 mm, de acordo com a norma C1708 (ASTM, 2019).

A Figura 44 mostra o cilindro do anel de escoamento utilizado no ensaio e a superfície horizontal em vidro, utilizada para determinar o diâmetro de espalhamento da mistura.

Figura 44 - Ensaio de fluidez inicial



Fonte: A autora (2021)

3.4.2 Retenção de fluxo

O ensaio da retenção de fluxo das argamassas foi realizado conforme a norma C1708 (ASTM, 2019), através da repetição do ensaio de fluidez inicial após 20 e 30 minutos da preparação das argamassas, indicando o tempo que estas argamassas mantêm sua propriedade autonivelante.

Para isto, antes de preencher o anel de escoamento, as argamassas foram misturadas novamente na cuba do misturador mecânico durante 5 a 10 s em velocidade baixa. Os diâmetros de espalhamento nas duas direções aos 20 e 30 minutos foram registrados, em milímetros, para avaliar a capacidade de retenção do fluxo das misturas.

A norma recomenda que argamassas autonivelantes com tempos de retenção de fluxo menores ou maiores que 20 a 30 minutos podem ter seus valores de espalhamento registrados em intervalos de 10 minutos, até que o material não apresente mais o escoamento mínimo.

3.4.3 Tempo de regeneração

O ensaio de tempo de regeneração consiste em realizar cortes específicos na superfície da argamassa durante intervalos regulares para determinar por quanto tempo uma argamassa autonivelante possui a capacidade de retornar ao seu estado original após uma deformação, sem apresentar desníveis ou marcas (ASTM, 2019).

Para este ensaio, a norma C1708 (ASTM, 2019) indica o uso de uma fôrma retangular com dimensões mínimas de 210 x 210 mm e profundidade mínima de 9mm, de metal ou vidro.

Imediatamente após o preparo da mistura autonivelante, a argamassa foi despejada na forma até atingir uma espessura de 6 +/- 1 mm. Após 10 minutos do início do preparo da argamassa, foram realizados cortes até a profundidade total da argamassa utilizando uma barra de metal, com inclinação de 45°, puxando a barra suavemente pela mistura, conforme mostrado na Figura 45.

O primeiro corte teve início a uma distância de 25mm da fôrma. Foram feitos cortes, espaçados em 25 mm, a cada 5 minutos, até que o material não regenerasse mais.

Figura 45 – Cortes na argamassa para o ensaio de tempo de regeneração



Fonte: C1708 (ASTM, 2019)

Antes da avaliação, o material foi curado ao ar a noite toda. O tempo de regeneração foi determinado observando os cortes feitos no dia anterior, principalmente na parte central destes. O tempo de regeneração é determinado como o maior tempo no qual o corte realizado na argamassa não retoma naturalmente.

3.4.4 Determinação do tempo de pega

O ensaio para determinação do tempo de início e fim de pega das argamassas foi realizado em conformidade com as normas NBR 12128 (ABNT, 2019) e C191 (ASTM, 2019), através do aparelho de Vicat, conforme demonstrado na Figura 46.

Figura 46 - Equipamentos utilizados no ensaio de determinação do tempo de pega



Fonte: A autora (2021)

Após o preparo da argamassa, a mistura foi inserida e nivelada no molde tronco-cônico do aparelho de Vicat. O cronômetro foi acionado a partir do momento que a amostra entrou em contato com a água. Em seguida, foi ajustado o marcador, deixando a agulha penetrar na pasta lentamente.

Após cada penetração efetuada, a agulha foi limpa e a base ligeiramente movimentada, de forma que cada tentativa fosse efetuada a uma distância mínima de 5 mm uma da outra e de 10 mm do contorno da face exterior do molde. As medições iniciaram 30 minutos após a preparação da argamassa.

O tempo de início de pega, definido em minutos, é definido pelo instante que a agulha penetra a 1mm da base e o tempo de fim de pega é o instante que a agulha não penetra mais na pasta. De acordo com a norma C1708 (ASTM, 2019), argamassas autonivelantes de pega rápida resultarão em tempos de início de pega entre 1 e 3 horas.

Todas as amostras foram ensaiadas simultaneamente, atendendo as mesmas condições de temperatura e umidade ambiente.

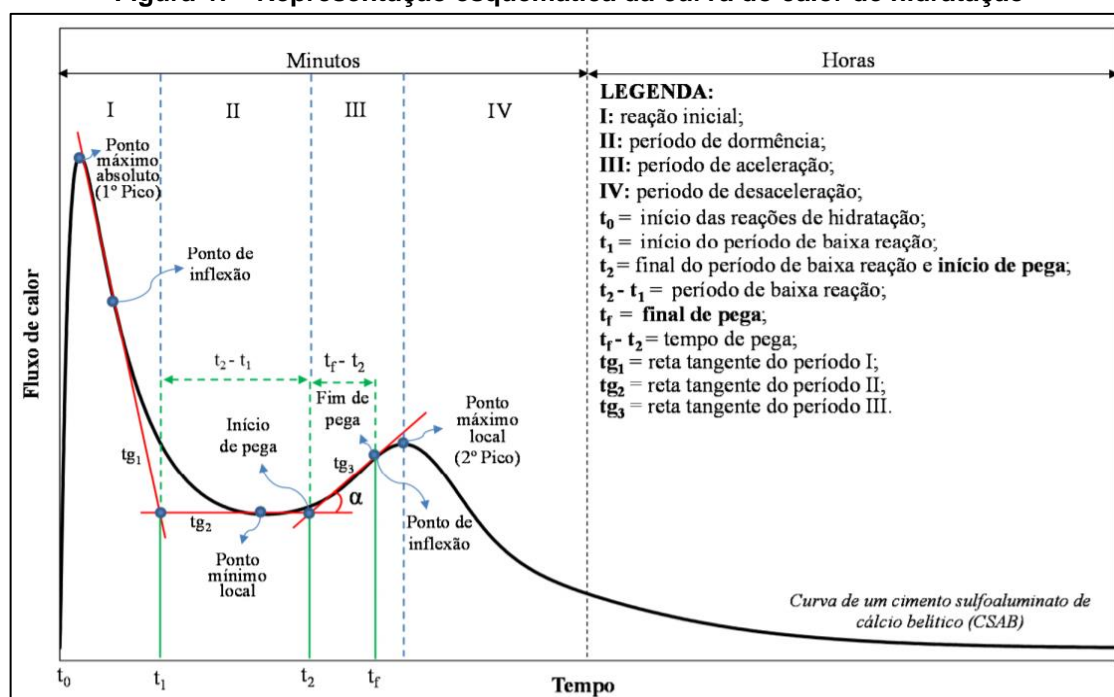
3.4.5 Calor de hidratação

A avaliação do calor de hidratação das misturas autonivelantes foi realizada com o calorímetro da marca ImpacLog IP7018, no laboratório de Materiais de Construção Civil da UDESC, em Joinville/SC.

Após o preparo das argamassas, 300 ml para cada mistura, conforme descrito no item 3.3, as amostras foram inseridas em uma caixa termicamente isolada, feita em poliestireno expandido (EPS), criando uma condição semi-adiabática, ou seja, com trocas de calor reduzidas com o ambiente. Os termopares foram posicionados no centro das misturas e ajustados para leituras a cada 2 minutos, enviando os dados de tempo e temperatura para um computador conectado.

Foram analisadas as argamassas produzidas com os resíduos de fosfogesso natural e calcinado e de cerâmica branca através de análise gráfica das curvas de temperatura *versus* tempo geradas pelo calor de hidratação ao longo do tempo, conforme apresentado na Figura 47, a fim de avaliar o comportamento das reações de hidratação no decorrer do tempo de cura das argamassas.

Figura 47 - Representação esquemática da curva do calor de hidratação



Fonte: Adaptado de Costa (2016)

3.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, foram realizados ensaios para avaliar as propriedades físicas e mecânicas das argamassas autonivelantes.

3.5.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi executado de acordo com as normas NBR 7215 (ABNT, 2019) e C109 (ASTM, 2020). Para avaliar a resistência a compressão das argamassas autonivelantes foram moldados corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Seguindo a norma C109 (ASTM, 2020), para cada mistura foram produzidos 9 corpos de prova ao total, 3 foram rompidos no primeiro dia, 3 aos 7 dias e os 3 restantes aos 28 dias, sendo moldados imediatamente após o preparo das argamassas e desmoldados após 24 horas. Os corpos de prova não ensaiados neste período foram curados em temperatura ambiente.

Para o rompimento dos corpos de prova foi utilizada a prensa hidráulica do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UDESC, em Joinville/SC, da marca EMIC PC 200I, com capacidade nominal de 200 toneladas. A carga aplicada em cada amostra foi de 500 +/- 50 N/s até a ruptura.

3.5.2 Resistência à tração na flexão

As normas utilizadas para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão foram: NBR 13279 (ABNT, 2005) e C348 (ASTM, 2019). Para cada mistura foram moldados 6 corpos de prova prismáticos com 40 x 40 x 160 mm, sendo moldados imediatamente após o preparo das misturas e desmoldados após 24 horas.

Destes, a norma C1708 (ASTM, 2019) indica que 3 sejam rompidos após as 24 horas e o restante aos 28 dias. No entanto, a prensa hidráulica disponível para os ensaios não registrou com precisão os resultados de resistência à tração na flexão após 24 horas. Desta forma, a primeira verificação de resistência foi efetuada aos 3 dias de idade.

Para o rompimento dos corpos de prova foi utilizada a mesma prensa hidráulica do ensaio de resistência à compressão, aplicando uma carga de 50 +/- 10 N/s até a ruptura. Cada corpo de prova foi posicionado de forma que a distribuição de carga fosse uniforme, sem nenhuma tensão de torção, conforme ilustrado na Figura 48.

Figura 48 - Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: A autora (2021)

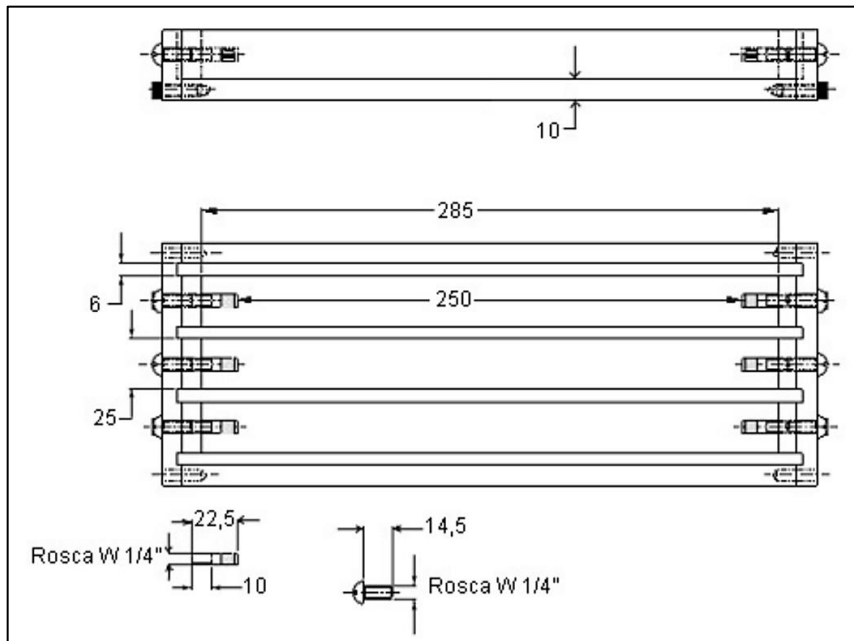
3.5.3 Retração linear

O acompanhamento da retração linear é utilizado para analisar as possíveis variações de comprimento decorrentes de expansão ou retração nas argamassas e foi realizado de acordo com as normas NBR 15261 (ABNT, 2005) e C157 (ASTM, 2017).

Para a realização do ensaio foram moldados três corpos de prova para cada mistura de argamassa analisada. Foram utilizados moldes prismáticos metálicos com dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm, com comprimento efetivo, ou seja, comprimento entre as extremidades internas dos pinos de medida, de 250 mm, conforme ilustrado na Figura 49.

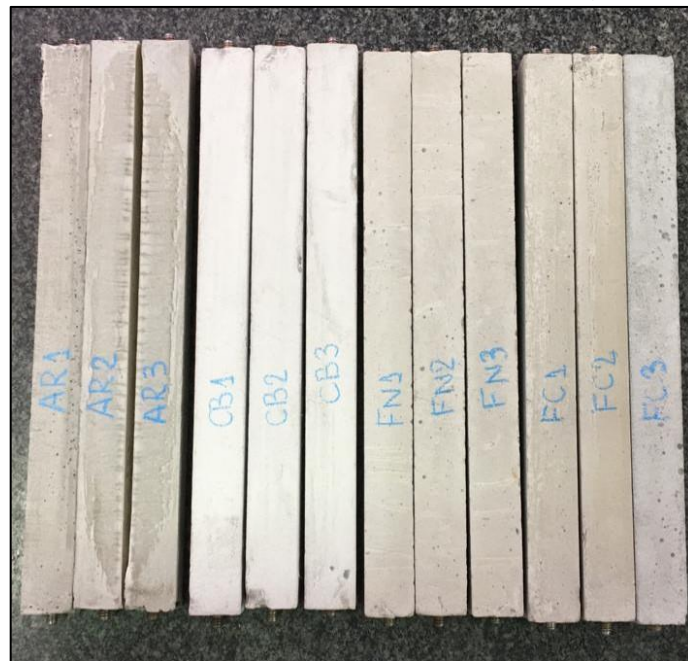
A moldagem foi efetuada em duas camadas, aplicando 25 golpes uniformemente distribuídos com o soquete em cada camada. Os pinos foram simetricamente colocados, coincidindo com o eixo do molde. Os corpos de prova executados estão ilustrados na Figura 50.

Figura 49 - Molde utilizado nos ensaios de retração



Fonte: Adaptado de NBR 15261 (ABNT, 2005)

Figura 50 - Corpos de prova do ensaio de retração linear



Fonte: A autora (2021)

Os corpos de prova foram mantidos à temperatura e umidade ambiente. Para medir a variação de comprimento, foi utilizado um relógio comparador com resolução de 0,001 mm, conforme mostrado na Figura 51. Antes de cada leitura, o aparelho foi verificado com uma barra padrão devidamente aferida e provida de uma marca que permitiu colocá-la sempre na mesma posição cada vez que o comprimento foi medido.

Figura 51 - Equipamento utilizado no ensaio de retração linear



Fonte: A autora (2021)

Para as argamassas autonivelantes, a norma C157 (ASTM, 2017) recomenda que os corpos de prova sejam desmoldados após 24 horas, a primeira leitura seja realizada após 24 h +/- 15 min, determinando a massa do corpo de prova e a leitura inicial (L_0 e m_0), e as leituras (L_i) e determinações de massa (m_i) seguintes sejam registradas aos 3, 7, 14 e 28 dias, com as argamassas permanecendo em temperatura ambiente.

De acordo com a NBR 15261 (ABNT, 2005), como resultados deverão ser apresentados os valores correspondentes às variações dimensionais, onde a expansão deverá ser representada com um número positivo e a retração como um número negativo, e de massa. A variação dimensional foi calculada conforme a Equação 4, e a variação de massa aplicando a Equação 5:

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (4)$$

Onde, ε_i é a medida de variação dimensional (mm/m), L_i é a leitura efetuada na idade final (mm), L_0 é a leitura efetuada após a desforma (mm) e i é a idade de leitura.

$$\Delta m_i = \frac{m_i - m_o}{m_o} \cdot 100 \quad (5)$$

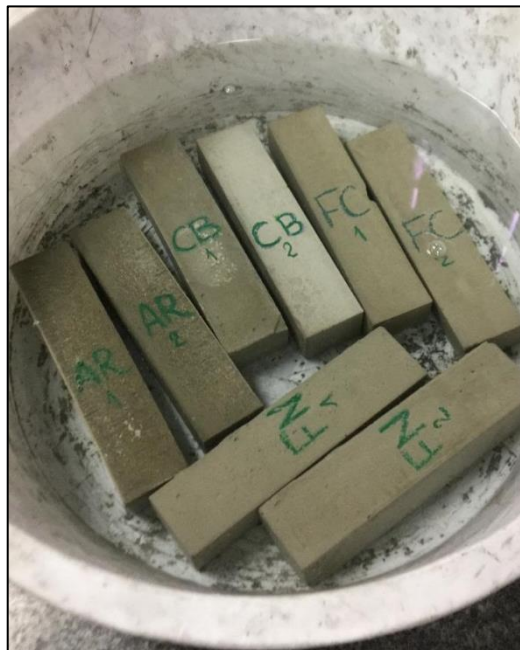
Onde, Δm_i é a variação de massa (%), m_i é a massa na idade final (g), m_o é a massa após a desforma do corpo (g).

3.5.4 Massa específica, índice de vazios e absorção de água

O ensaio para determinar a massa específica, índice de vazios e absorção de água nas argamassas no estado endurecido foi realizado em conformidade com a NBR 9778 (ABNT, 2009). De acordo com a norma, o conceito de massa específica trata-se da relação entre a massa do material e o volume da amostra, índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra e absorção de água é definido como o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis.

Para a realização do ensaio, foram moldadas duas amostras de argamassa conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). Estas amostras foram secas em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C durante 72 horas, e sua massa foi registrada. Após este procedimento, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura de 23 ± 2 °C durante 72 horas, conforme Figura 52.

Figura 52 - Corpos de prova imersos em água



Fonte: A autora (2021)

Completada esta etapa, a amostra foi inserida em um recipiente cheio de água, que foi progressivamente levado à ebulição por um período de 5 horas, mantendo aproximadamente constante o volume de água. Após isto, a água foi naturalmente resfriada até a temperatura de 23 ± 2 °C, e a massa da amostra foi determinada com uma balança hidrostática. As amostras foram retiradas, secas com um pano úmido e pesadas novamente.

A absorção de água foi calculada conforme a Equação 6:

$$A = \frac{msat - ms}{ms} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde, A é a absorção de água (%), $msat$ é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura e ms é a massa da amostra seca em estufa.

O índice de vazios foi determinado através da Equação 7:

$$I_v = \frac{msat - ms}{msat - mi} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde, I_v é o índice de vazios (%) e mi é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

Por fim, a massa específica das amostras foi calculada utilizando a Equação 8:

$$\rho_r = \frac{ms}{msat - mi} \quad (8)$$

Onde, ρ_r é a massa específica real (g/cm³).

3.5.5 Resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração das argamassas autonivelantes foi executado conforme a NBR 13528 (ABNT, 2019). O equipamento de tração utilizado neste ensaio foi um dinamômetro manual da marca Solotest dotado de dispositivo para leitura, que permite aplicação contínua de carga centrada e ortogonal ao plano do revestimento.

O substrato utilizado para o ensaio foi uma laje em concreto armado curada ao tempo, construída de forma a simular uma situação real no canteiro de obras. Após a

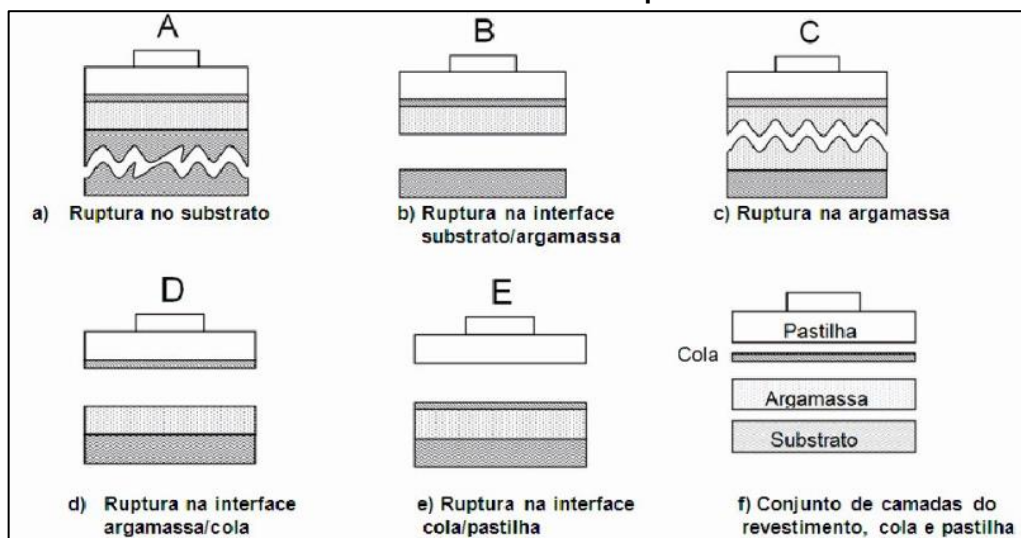
limpeza do substrato, foi aplicada a argamassa autonivelante com espessura de 15 mm. Foram utilizadas pastilhas metálicas para o arrancamento devido ao esforço de tração com seção circular com diâmetro de 50 mm e cola à base de resina epóxi de alta aderência com espessura de 2 mm.

O ensaio foi realizado no revestimento com 28 dias de idade, conforme recomendação da norma técnica. Para cada mistura, foram retirados 12 corpos de prova com pontos de arrancamento espaçados entre si, dos cantos e quinas em pelo menos 50 mm. O corte do revestimento foi executado a seco, com auxílio de serra-copo, sem comprometer a integridade do revestimento, iniciando com velocidade baixa e aumentando conforme a profundidade, sendo estendido de 1 a 5 mm dentro do substrato. A Figura 54 ilustra as etapas do ensaio realizado.

As normas de contrapiso de argamassa autonivelante não estabelecem valores de referência para a resistência de aderência à tração nestas misturas, portanto serão utilizados como valor de referência os limites de resistência de aderência de revestimentos de paredes e tetos da NBR 13749 (ABNT, 2013), listados na Tabela 4 do presente trabalho, embora as solicitações sejam diferentes.

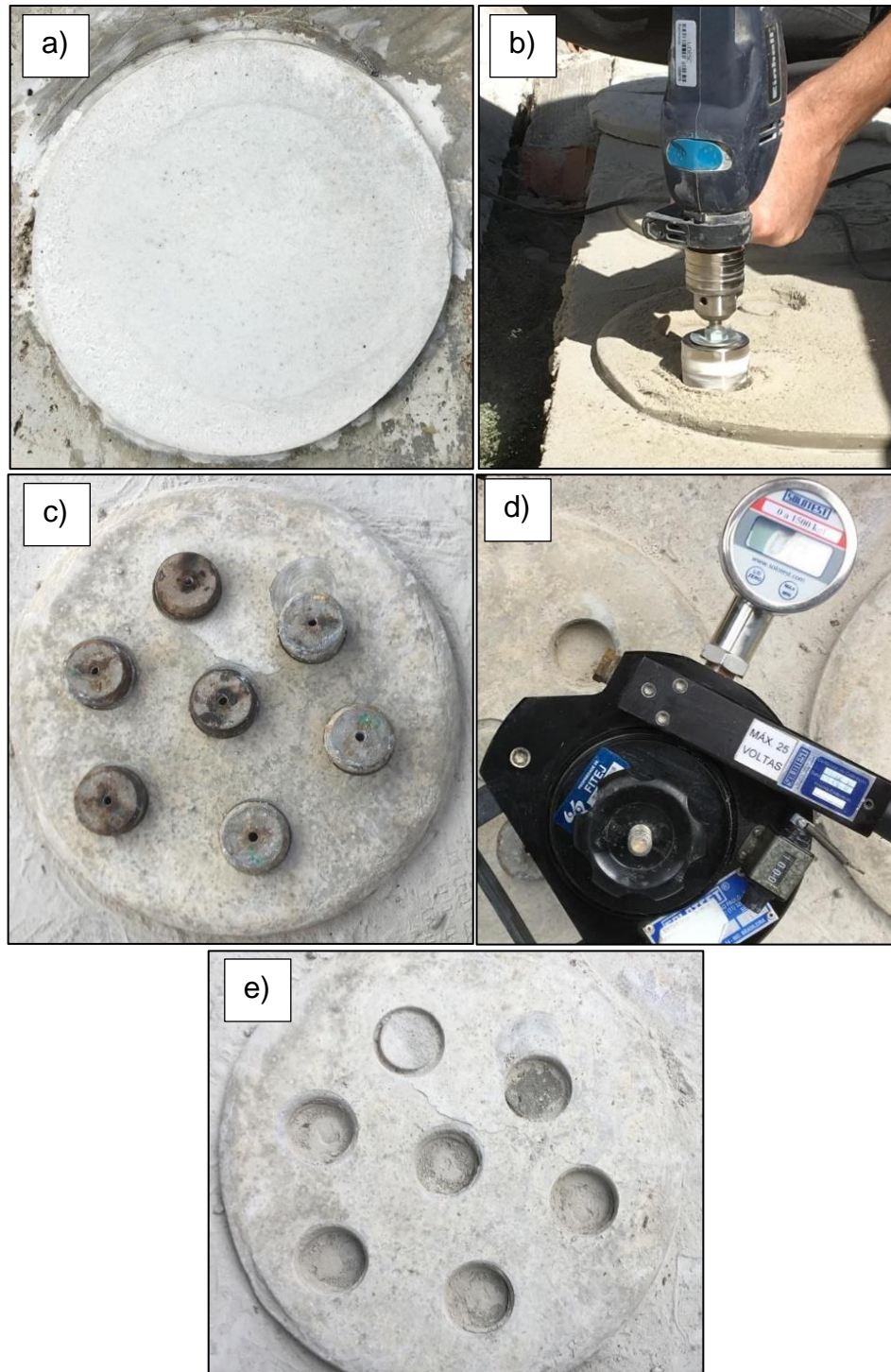
Neste ensaio, foi determinada a carga, em Newtons (N), obtida para cada corpo de prova ensaiado e a área da seção transversal do corpo de prova, em mm². Além disso, foi avaliado o tipo de ruptura, pois esta nem sempre ocorre na interface entre o revestimento e o substrato. De acordo com a NBR 13528 (ABNT, 2019), as rupturas podem ser identificadas de acordo com o ilustrado na Figura 53.

Figura 53 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento sem chapisco



Fonte: Adaptado de NBR 13528 (ABNT, 2019)

Figura 54 - Etapas do ensaio de resistência de aderência à tração: a) Moldagem da argamassa no substrato de base cimentícia; b) Corte para fixação das pastilhas; c) Colagem das pastilhas com cola à base de resina epóxi de alta aderência; d) Determinação da resistência de aderência à tração; e) Corpos de prova extraídos da amostra.



Fonte: A autora (2021)

3.5.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para avaliar a microestrutura das argamassas preparadas com os resíduos de fosfogesso natural e calcinado e de cerâmica branca, foram obtidas imagens utilizando o microscópio eletrônico de varredura modelo Field Emission JSM-6701F associado a um Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS) no Laboratório de Caracterização de Materiais.

As amostras, após o ensaio de compressão aos 28 dias, foram cortadas do corpo de prova prismático com o auxílio de uma serra-fita. Em seguida, foram lixadas e polidas, para então serem recobertas com material condutor, tornando possível a análise microscópica.

3.5.7 Análise estatística dos dados

Os resultados obtidos experimentalmente foram avaliados através de análise estatística utilizando análise de variância (ANOVA).

A análise de variância foi utilizada para verificar o efeito da incorporação dos resíduos de fosfogesso natural e calcinado e de cerâmica branca na resistência à compressão e à tração das argamassas autonivelantes do estudo. O nível de confiança adotado foi de 5% ($\alpha = 0,05$), desta forma, apenas as variáveis que apresentarem p-valor menor que 0,05 serão consideradas como tendo um efeito significativo nos resultados obtidos.

3.5.8 Análise de custo e viabilidade

Foram avaliados os custos das argamassas produzidas com os resíduos, a fim de comparar com a argamassa de referência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo destina-se a apresentar os resultados do desenvolvimento do programa experimental para obter misturas autonivelantes para contrapiso. Inicialmente, estão apresentados os resultados da caracterização dos materiais, seguido da avaliação das argamassas nos estados fresco e endurecido e, por fim, a análise de custo e viabilidade.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Caracterização da areia

Após a realização do ensaio de granulometria através do peneiramento, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), determinou-se que a areia utilizada nas misturas possui módulo de finura igual a 1,24 e diâmetro máximo dos grãos de 1,18 mm, conforme demonstrado na Tabela 7, sendo classificada como agregado miúdo fino, por possuir módulo de finura inferior a 2,40. A massa específica é de 2,60 g/cm³ e a massa unitária aparente encontrada foi de 1,43 g/cm³.

Os valores encontrados para o módulo de finura e diâmetro máximo dos grãos de areia são iguais aos obtidos por Mendes (2019), que também encontrou valores similares para massa específica e massa unitária, de 2,57 g/cm³ e de 1,46 g/cm³, respectivamente.

A Tabela 7 apresenta um resumo da caracterização da areia utilizada nas argamassas avaliadas e a Tabela 8 os resultados obtidos do peneiramento.

Tabela 7 - Caracterização do agregado miúdo

Módulo de finura (MF)	Diâmetro máximo dos grãos	Massa específica	Massa unitária
1,24	1,18 mm	2,60 g/cm ³	1,43 g/cm ³
NBR 248	NBR 248	NBR 16916	NBR 16916

Fonte: A autora (2021)

Tabela 8 - Ensaio de granulometria da areia

Granulometria do agregado miúdo - NBR NM 248 (ABNT, 2003)							
Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (g) =		300,00		(Vr)	(Mrm)	(Mra)
	b) massa inicial seca (g) =		300,00		Massa retida	Massa retida	Massa retida
	Mrg) Massa retida (g)		Mr%) Massa retida (%)		Variações	média	acumulada
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b	+ 4 %	(%)	(%)
9,5	0,0	0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
6,3	0,0	0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4,75	0,0	0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2,36	0,0	0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,18	0,1	0,1	0,02%	0,02%	0,00%	0,02%	0,02%
0,6	3,3	3,4	1,10%	1,14%	0,04%	1,12%	1,12%
0,3	84,5	85,5	28,16%	28,51%	0,35%	28,34%	29,46%
0,15	194,1	192,4	64,69%	64,14%	0,55%	64,42%	93,87%
Fundo	18,1	18,6	6,04%	6,21%	0,16%	6,13%	100,00%
Mt) Total	300,0	300,0	Módulo de Finura =				1,24

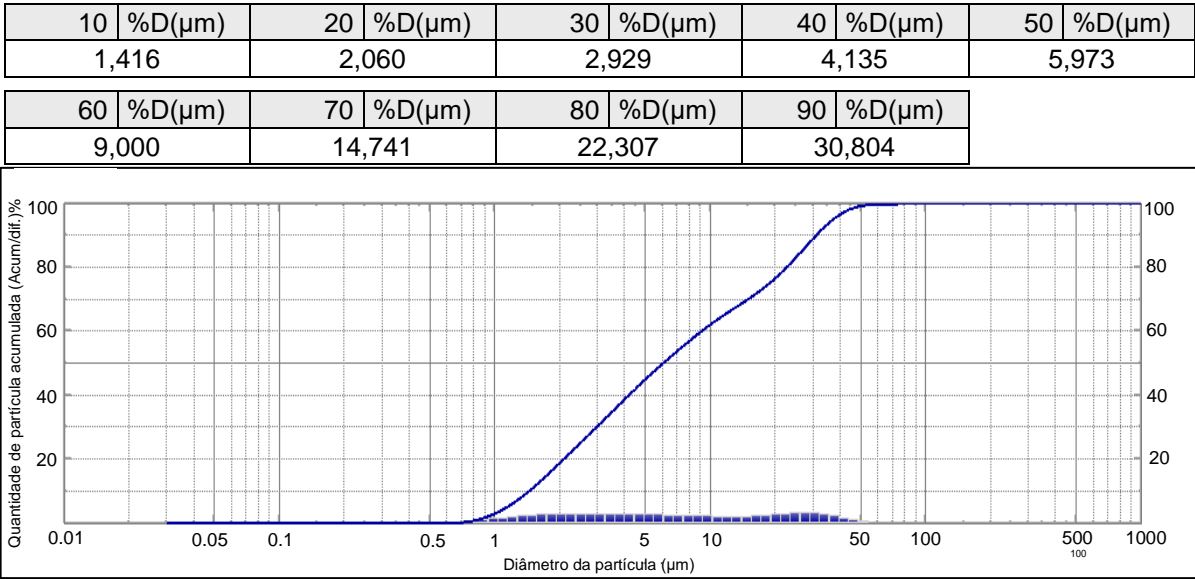
Fonte: A autora (2021)

4.1.2 Caracterização dos resíduos

A granulometria dos resíduos foi realizada através de difração a laser. O resíduo de fosfogesso natural utilizado no trabalho apresentou diâmetro máximo dos grãos de 60 μm . Do total de partículas, 10% possuem dimensão inferior a 1,41 μm , 50% das partículas possuem dimensão inferior a 5,97 μm e 90% das partículas possuem dimensão inferior a 30,80 μm . A distribuição granulométrica obtida para este material está ilustrada na Figura 55.

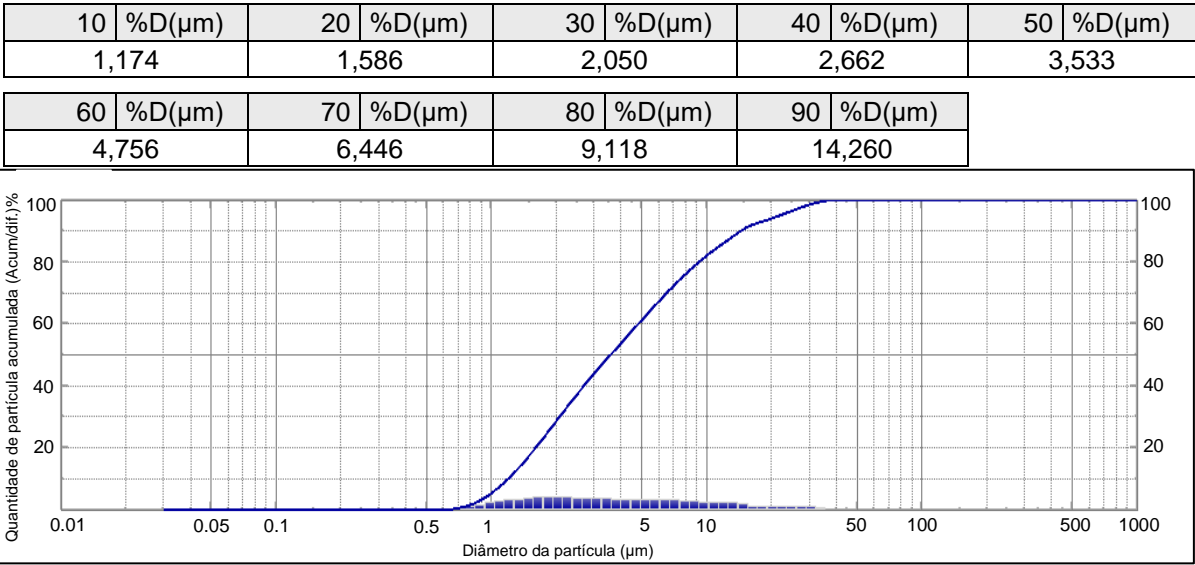
A cerâmica branca apresentou diâmetro máximo dos grãos de 36 μm . Além disso, 10% das partículas possuem dimensão inferior a 1,17 μm , 50% das partículas possuem dimensão inferior a 3,53 μm e 90% das partículas possuem dimensão inferior a 14,26 μm . O tamanho médio dos grãos é cerca de 41% menor que o fosfogesso. A distribuição granulométrica do material está ilustrada na Figura 56.

Figura 55 - Distribuição granulométrica do fosfogesso



Fonte: A autora (2021)

Figura 56 - Distribuição granulométrica da cerâmica branca



Fonte: A autora (2021)

Outros autores também trabalharam com resíduos incorporados na argamassa autonivelante. No estudo de Yang, Zhang e Yan (2016) foram obtidas partículas de fosfogesso natural com tamanho variando entre 1,6 e 208,9 μm e tamanho médio de 51,6 μm. Já no estudo de Mendes (2019) foi utilizado o resíduo do corte de mármore e graníticos (RCMG) com diâmetro médio dos grãos de 45,98 μm e diâmetro máximo de 153,81 μm.

A massa específica obtida através do frasco volumétrico de Le Chatelier para o fosfogesso natural foi 2,69 g/cm³ e para a cerâmica branca 2,73 g/cm³. Yang, Zhang

e Yan (2016) obtiveram o valor de massa específica para o fosfogesso natural de 2,35 g/cm³, próximo ao encontrado no presente estudo.

O índice de desempenho dos resíduos com cimento Portland aos 28 dias foi definido através da determinação da resistência à compressão da argamassa “A”, elaborada com cimento e areia e das argamassas “B”, produzidas com 25% de substituição da massa de cimento pelo resíduo de fosfogesso natural e de cerâmica branca, a fim de definir a atividade pozolânica destes materiais. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Resistência à compressão das argamassas avaliadas

Argamassa	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
Argamassa "A"	16,92 ± 3,68
Argamassa "B" (25% Cerâmica branca)	20,08 ± 2,62
Argamassa "B" (25% Fosfogesso natural)	5,26 ± 0,53

Fonte: A autora (2021)

O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias da argamassa “B” produzida com 25% de substituição da massa de cimento pelo resíduo de cerâmica branca foi de 118,68%. Para a argamassa “B” produzida com o fosfogesso natural o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias foi de 31,09%.

A NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece como requisito físico mínimo para os materiais pozolânicos que estes apresentem índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias de pelo menos 90%. A partir dos resultados obtidos, para este requisito, conclui-se que a cerâmica branca apresenta atividade pozolânica. O fosfogesso natural, no entanto, não pode ser classificado como material pozolânico, pois apresentou índice de desempenho 31,09% com cimento Portland aos 28 dias.

A análise química da fluorescência de raios-X (FRX) indicou que o resíduo de fosfogesso é constituído principalmente de CaO (óxido de cálcio) e SO₃ (enxofre). A cerâmica branca apresenta em sua composição química principalmente SiO₂ (dióxido de silício) e Al₂O₃ (óxido de alumínio).

Os resultados encontrados para o fosfogesso natural e calcinado e a cerâmica branca estão listados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente, onde são realizadas também as comparações com resultados obtidos por outros autores.

O fosfogesso apresentou percentual maior de CaO (óxido de cálcio) após ser calcinado na temperatura de 450 °C pelo período de 4 horas, passando de 56,21% para 71,75%, assim como observado por Schaefer, Cheriaf, Rocha (2017). As quantidades de SO₃ (enxofre) diminuíram após o tratamento térmico, diferindo do resultado obtido por outros autores.

Tabela 10 - Análise química por FRX do fosfogesso natural e calcinado

Material (%)	Fosfogesso natural	Fosfogesso natural	Fosfogesso natural	Fosfogesso natural	Fosfogesso natural	Fosfogesso calcinado a 450 °C (anidrita II)	Fosfogesso calcinado a 450 °C (anidrita II)
Autor	Gong <i>et al.</i> (2019)	Oumnih <i>et al.</i> (2019)	Hyung, Han, Seo (2015)	Schaefer, Cheriaf, Rocha (2017)	A autora (2021)	Schaefer, Cheriaf, Rocha (2017)	A autora (2021)
CaO	35,62	31,51	32,28	38,56	56,21	53,53	71,75
SiO ₂	2,39	0,5	1,08	0,82	1,67	0,92	1,05
Al ₂ O ₃	0,03	0,11	0,07	0,41	0	0,10	0
Fe ₂ O ₃	0,83	0,05	0,21	0,89	1,07	1,03	2,06
SO ₃	47,10	46,9	43,29	24,59	39,76	34,10	22,18
MgO	0,62	1,59	0,05	0	0	0,00	0
TiO ₂	0	0	0,04	0	1,29	0,00	1,92
Na ₂ O	0	0,03	0	3,99	0	3,85	0
P ₂ O ₅	1,14	0,35	0,58	1,13	0	1,01	0,98
Outros	12,27	18,96	22,4	29,61	0	5,46	0,05

Fonte: A autora (2021)

Tabela 11 - Análise química por FRX da cerâmica branca

Material (%)	Cerâmica Branca	Cerâmica Branca	Cerâmica Branca	Cerâmica Branca	Cerâmica Branca	Cerâmica Branca
Autor	Melo (2017)	Lasseuguette <i>et al.</i> (2019)	Medina <i>et al.</i> (2013)	Torgal; Jalali (2011)	Higashiyama <i>et al.</i> (2012)	A autora
CaO	1,42	7,00	2,41	0,20	0,76	2,47
SiO ₂	66,62	68,9	67,91	65,00	70,90	62,63
Al ₂ O ₃	15,58	19,8	22,01	21,30	21,10	29,83
Fe ₂ O ₃	8,18	0,90	1,41	1,30	0,81	1,71
SO ₃	0	0	0,07	0	0	0
MgO	1,79	0,30	0,29	0,30	0,24	0
TiO ₂	0,83	0,70	0,45	0,20	0,33	0,65
Na ₂ O	1,18	0,30	1,91	2,50	1,47	0
K ₂ O	3,84	1,70	2,79	3,70	3,57	2,69
Outros	0,56	0,40	0,75	5,50	0,82	0,02

Fonte: A autora (2021)

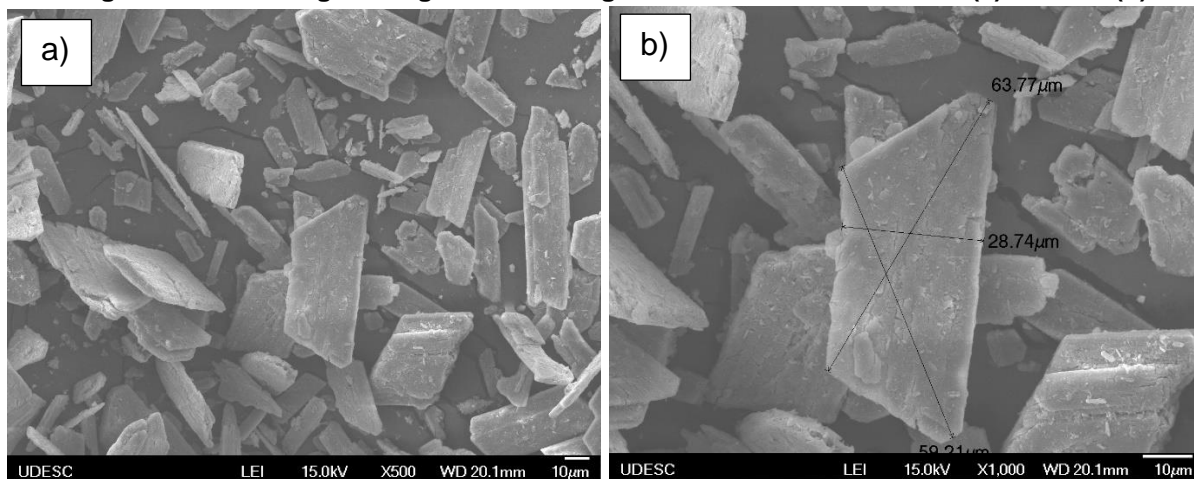
A NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece como requisito químico para os materiais pozolânicos que estes apresentem em sua composição química uma concentração total de sílica, alumina e óxido de ferro maior que 70% e concentração de SO_3 menor que 4%.

Portanto, os fosfogessos natural e calcinado não atenderam aos requisitos químicos para serem classificados como materiais pozolânicos, pois não possuem as concentrações mínimas de sílica, alumina e óxido de ferro, além de apresentarem quantidades maiores de SO_3 .

A cerâmica branca possui concentração de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 94,17\%$, além de não apresentar concentração de SO_3 em sua composição química. Desta forma, a cerâmica branca atendeu aos requisitos físicos e químicos, podendo ser classificada como material pozolânico.

Além disso, os resíduos foram avaliados quanto à morfologia. A Figura 57 ilustra o grão de fosfogesso natural passante na peneira de malha 45 μm , com ampliações de 500x e 1000x, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Observa-se que o grão possui formato irregular e angular, arestas vivas e cantos, apresentando maior área específica.

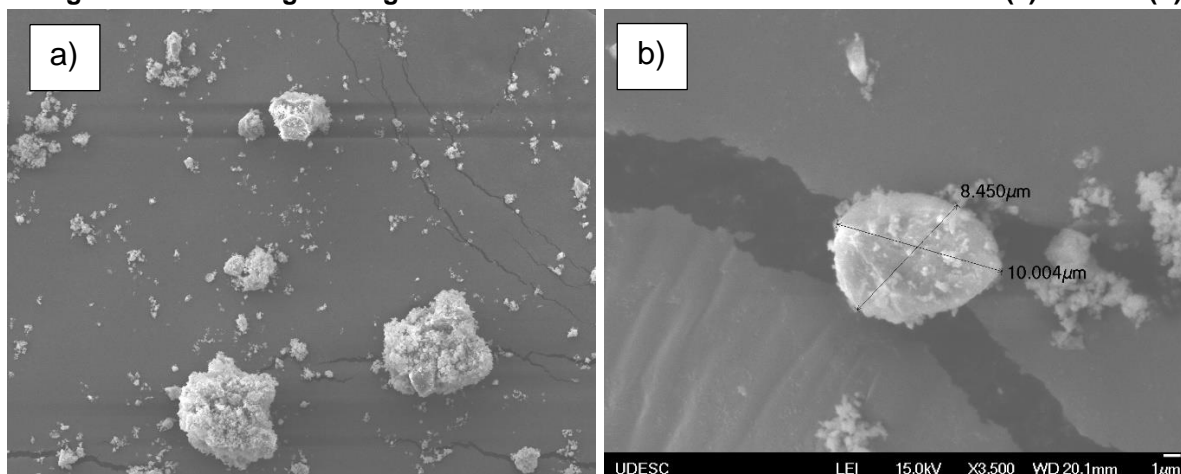
Figura 57 - Morfologia dos grãos de fosfogesso com aumento de 500x (a) e 1000x (b)



Fonte: A autora (2021)

A Figura 58 mostra a morfologia do grão de cerâmica branca passante na peneira de malha 45 μm obtida pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), com ampliações de 500x e 3500x. Pode-se observar que o grão apresenta formato arredondado, com partículas maiores e menores distribuídas.

Figura 58 - Morfologia dos grãos de cerâmica branca com aumento de 500x (a) e 3500x (b)



Fonte: A autora (2021)

4.2 DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

Foram realizadas misturas de argamassas autonivelantes com substituição de 50% da massa de cimento pelos resíduos de fosfogesso natural e calcinado e cerâmica branca. Adotou-se a proporção dos materiais elaborada por Mendes (2019) para a argamassa de referência. Em seguida, foram desenvolvidas dosagens utilizando os resíduos. A aceitação das misturas desenvolvidas levaram em consideração a obtenção de argamassas com diâmetro mínimo de espalhamento de 125 mm e máximo de 150 mm, além de ausência de segregação e exsudação.

Para obter uma dosagem que atendesse estes parâmetros utilizando o resíduo de fosfogesso natural, adotou-se como ponto de partida o traço proposto por Mendes (2019), que substituiu 50% da massa de cimento pelo resíduo do corte de mármore e graníticos (RCMG). Este traço foi denominado de T1-FN e está listado na Tabela 12. Esta dosagem, no entanto, não apresentou fluidez, não sendo possível mensurar o diâmetro de espalhamento.

A fim de atingir o diâmetro de espalhamento mínimo, alterou-se o fator água/cimento para 0,65 e a porcentagem de aditivo superplastificante para 0,60%, resultando no traço T2-FN. Porém, a mistura ainda não apresentava fluidez para a realização do ensaio de espalhamento. Para o T3-FN, alterou-se apenas a quantidade de aditivo superplastificante para 0,75%, mantendo as proporções dos outros materiais, a fim de aumentar a fluidez através da dispersão das partículas, porém sem alterar o consumo de água. Esta dosagem não apresentou segregação, porém não atingiu o diâmetro de espalhamento mínimo.

Na dosagem denominada T4-FN foi utilizado 1,00% de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento, assim como nas misturas autonivelantes desenvolvidas por Katsiadramis; Sotiropoulou; Pandermarakis (2010).

A mistura obteve o diâmetro de espalhamento mínimo, porém apresentou segregação, devido ao aumento da quantidade de aditivo superplastificante. Por fim, foi realizada a mistura T5-FN, utilizando a proporção de 0,90% de aditivo superplastificante e fator água/cimento de 0,65, resultando em uma argamassa coesa e homogênea com diâmetro de espalhamento de 135 mm e ausência de segregação. A Tabela 12 apresenta a composição dos traços realizados.

A fluidez das argamassas contendo fosfogesso natural é afetada pois a área específica do fosfogesso é maior e sua morfologia é irregular, necessitando mais água para manter a fluidez da mistura.

Tabela 12 - Dosagem de argamassas com fosfogesso natural

Dosagem	Proporção dos materiais						Diâmetro (mm)	Segregação
	Cimento CP II Z-32	Areia	Resíduo	Água/cimento	Aditivo SP	Aditivo MV		
T1-FN	1	1,5	0,5	0,55	0,50%	1,00%	-	-
T2-FN	1	1,5	0,5	0,65	0,60%	1,00%	-	-
T3-FN	1	1,5	0,5	0,65	0,75%	1,00%	110	Não
T4-FN	1	1,5	0,5	0,65	1,00%	1,00%	145	Sim
T5-FN	1	1,5	0,5	0,65	0,90%	1,00%	135	Não

Fonte: A autora (2021)

Nas argamassas autonivelantes contendo o resíduo de fosfogesso calcinado, a mistura mantendo as proporções de aditivo superplastificante (1,00% da massa de materiais cimentícios) e relação água/cimento do traço selecionado para a argamassa autonivelante com fosfogesso natural apresentou diâmetro de 165 mm e segregação. Portanto, foi necessário diminuir a adição de superplastificante. Optou-se pela redução de 0,90% para 0,75%, identificado como T2-FC, obtendo diâmetro de espalhamento de 150 mm e presença de segregação.

Com a diminuição para 0,50% de aditivo superplastificante e mesma relação água/cimento do traço T5-FN foi possível alcançar uma mistura autonivelante com espalhamento de 125 mm e ausência de segregação, denominada T4-FC. A Tabela 13 apresenta os traços utilizados para as dosagens testadas.

Tabela 13 - Dosagem de argamassas com fosfogesso calcinado

Dosagem	Proporção dos materiais						Diâmetro (mm)	Segregação
	Cimento CP II Z-32	Areia	Resíduo	Água/cimento	Aditivo SP	Aditivo MV		
T1-FC	1	1,5	0,5	0,65	0,90%	1,00%	165	Sim
T2-FC	1	1,5	0,5	0,65	0,75%	1,00%	150	Sim
T3-FC	1	1,5	0,5	0,65	0,65%	1,00%	140	Sim
T4-FC	1	1,5	0,5	0,65	0,50%	1,00%	125	Não

Fonte: A autora (2021)

Para o ajuste da dosagem utilizando o resíduo de cerâmica branca, considerou-se, também, como ponto de partida o traço proposto por Mendes (2019). Este, foi denominado T1-CB, conforme listado na Tabela 14, que apresenta as misturas utilizadas. No entanto, para este traço, a argamassa apresentou diâmetro de espalhamento igual a 95 mm.

Tabela 14 - Dosagem de argamassas com cerâmica branca

Dosagem	Proporção dos materiais						Diâmetro (mm)	Segregação
	Cimento CP II Z-32	Areia	Resíduo	Água/cimento	Aditivo SP	Aditivo MV		
T1-CB	1	1,5	0,5	0,55	0,50%	1,00%	95	Não
T2-CB	1	1,5	0,5	0,60	0,50%	1,00%	105	Não
T3-CB	1	1,5	0,5	0,65	0,50%	1,00%	125	Não


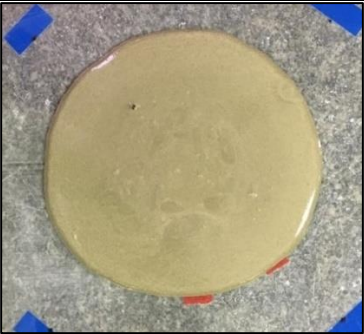


Fonte: A autora (2021)

Com a finalidade de obter o espalhamento mínimo, no traço T2-CB o fator água/cimento foi aumentado para 0,60, resultando em um espalhamento médio de 105 mm. Como o espalhamento obtido ainda não era adequado para utilização como argamassa autonivelante, o fator água/cimento foi aumentado para 0,65, resultando em uma argamassa com diâmetro de espalhamento de 125 mm, sem segregação, denominado T3-CB.

O formato arredondado do grão de cerâmica branca e a interface lisa contribuiu com o aumento da fluidez destas misturas, em comparação à morfologia do grão do fosfogesso natural.

A Tabela 15 apresenta um resumo das argamassas selecionadas e o traço escolhido. As misturas escolhidas apresentaram diâmetro mínimo de espalhamento de 125 mm e ausência de segregação e exsudação.

Tabela 15 - Tabela com resumo das argamassas estudadas

Argamassa	Proporção dos materiais	Imagens do ensaio de fluidez
AR	1:1:0,33:0,0033:0,0067 (cimento; areia; água; aditivo superplastificante; aditivo modificador de viscosidade)	
FN	1:1,5:0,5:0,65:0,0090:0,010 (cimento; areia; resíduo; água; aditivo superplastificante; aditivo modificador de viscosidade)	
FC	1:1,5:0,5:0,65:0,0050:0,010 (cimento; areia; resíduo; água; aditivo superplastificante; aditivo modificador de viscosidade)	
CB	1:1,5:0,5:0,65:0,0050:0,010 (cimento; areia; resíduo; água; aditivo superplastificante; aditivo modificador de viscosidade)	

Fonte: A autora (2021)

Como o objetivo do estudo foi proporcionar redução na quantidade de cimento, determinou-se o consumo de cimento das misturas. O consumo foi de 954,25 kg/m³ para a argamassa de referência, 572,69 kg/m³ nas argamassas contendo o resíduo

de fosfogesso e de 573,59 kg/m³ para as misturas produzidas com cerâmica branca. Para estas misturas foi utilizada massa específica do cimento de 3,0 g/cm³, da areia de 2,60 g/cm³, do fosfogesso 2,69 g/cm³ e da cerâmica 2,73 g/cm³.

Valores semelhantes de consumo foram descritos por Freitas *et al.* (2010), que obteve um consumo de cimento de 928,02 kg/m³ para uma dosagem de argamassa autonivelante com as proporções de 1:0,89, respectivamente cimento e areia, sem adições minerais.

Além disso, Mendes (2019) obteve consumo de 608,77 kg/m³ utilizando cimento de alta resistência inicial e substituição de 50% em massa do cimento por resíduo RCMG e Silva (2016) apresentou consumo de 522,42 kg/m³ nas formulações contendo 30% de substituição por cinza volante.

4.3 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.3.1 Fluidiez inicial, retenção de fluxo e tempo de regeneração

As argamassas foram avaliadas quanto à capacidade de fluidez inicial, definida imediatamente após o preparo das misturas, a retenção de fluxo, determinada após 20 e 30 minutos do preparo, e o tempo de regeneração. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de fluidez

Argamassa avaliada	Diâmetro de espalhamento inicial (mm)	Diâmetro de espalhamento 20 min. (mm)	Diâmetro de espalhamento 30 min. (mm)	Tempo de regeneração (minutos)
AR	125	125	125	15-20
FN	135	125	125	10-15
FC	125	125	125	15-20
CB	125	125	125	15-20

Fonte: A autora (2021)

Para a fluidez inicial, a norma C1708 (ASTM, 2019) recomenda que o diâmetro de espalhamento seja um valor compreendido entre 125 e 150 mm, no entanto não define limites mínimos e máximos para a retenção de fluxo. Porém, a análise desta propriedade é de fundamental importância para as argamassas autonivelantes, tendo em vista que este material deve apresentar trabalhabilidade adequada durante o

tempo necessário para aplicação, que muitas vezes é realizada por bombeamento. A Figura 59 ilustra o ensaio de fluidez inicial da mistura CB.

Figura 59 - Ensaio de espalhamento da argamassa com resíduo de cerâmica branca com diâmetro médio de 125 mm



Fonte: A autora (2021)

As misturas AR, FC e CB não apresentaram retenção de fluxo, mantendo o diâmetro de espalhamento após 20 e 30 minutos do preparo, enquanto a argamassa FN, produzida com o fosfogesso natural, apresentou diminuição de 10 mm (de 135 para 125 mm) no diâmetro de espalhamento após 20 e 30 minutos, porém mantendo o espalhamento mínimo de 125 mm.

Além disso, o tempo de regeneração das misturas autonivelantes AR, FC e CB ficou no intervalo compreendido entre 15 e 20 minutos, enquanto o intervalo da mistura FN ficou entre 10 e 15 minutos, indicando que esta apresenta-se incapaz de retornar ao seu estado original depois de sofrer alguma deformação após um tempo menor.

Este resultado pode estar relacionado com os ensaios de tempo de início de pega e de calor de hidratação, que demonstraram que a mistura FN apresentou o menor tempo de início de pega dentre todas as argamassas avaliadas e a maior liberação de calor nas horas iniciais.

A Figura 60 ilustra o ensaio de tempo de regeneração da mistura FN.

Figura 60 - Ensaio de tempo de regeneração

Fonte: A autora (2021)

4.3.2 Tempo de pega

Os resultados do tempo de pega obtidos com o aparelho de Vicat para as quatro misturas analisadas estão demonstrados na Tabela 17. Os ensaios foram realizados simultaneamente, mantendo as condições de temperatura e umidade ambiente.

Tabela 17 - Tempo de pega das argamassas avaliadas

Argamassa avaliada	Tempo de início de pega (h:min)	Tempo de fim de pega (h:min)	Diferença (h:min)
AR	08:40	09:15	00:35
FN	05:25	14:35	09:10
FC	08:20	08:50	00:30
CB	06:10	06:30	00:20

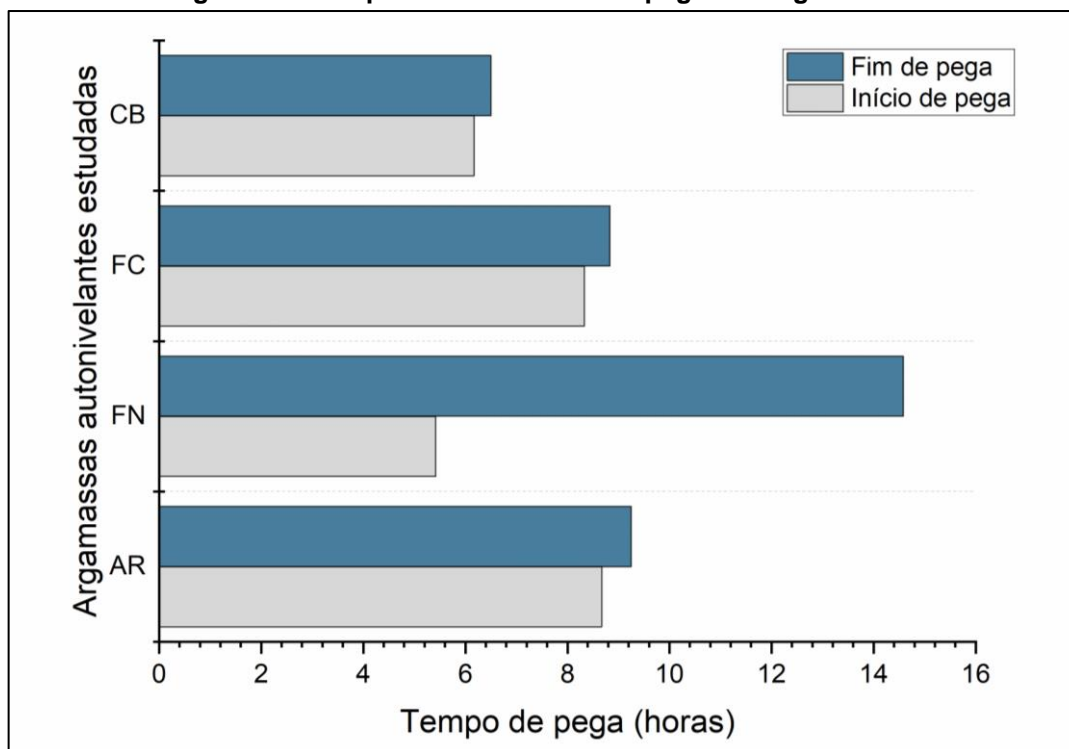
Fonte: A autora (2021)

Com estes resultados, pode-se observar que o menor tempo de início de pega registrado é o da argamassa FN, sendo 37,5% menor que o tempo de início de pega da AR, seguido do tempo de início de pega da mistura CB, que é 28,85% menor que a AR.

As argamassas AR e a FC apresentaram valores próximos para os tempos de início e fim de pega, bem como a diferença entre estes valores. Embora a diferença

entre os tempos de início e fim de pega tenha resultado em valores análogos também para a mistura CB, o tempo de início de pega aconteceu 2:30 h antes, em comparação com a AR, ficando evidenciado no gráfico comparativo da Figura 61.

Figura 61 - Tempos de início e fim de pega das argamassas



Fonte: A autora (2021)

Na análise dos tempos de fim de pega, nota-se que a argamassa FN apresentou tempo consideravelmente superior às demais, resultando em um tempo de fim de pega 57% maior que o da AR. Já a mistura FC apresentou tempo de fim de pega menor em comparação à FN.

Schaefer (2013) explica que isto acontece pois quanto maior a temperatura de calcinação, maior a área específica do fosfogesso, resultando em um endurecimento mais rápido.

Os valores encontrados por Mendes (2019) no traço contendo o resíduo de RCMG para início de pega foi de 11:20 (h:min) e no fim de pega de 12:20 (h:min), sendo aproximadamente 2 vezes maior que os tempo obtidos para a mistura CB.

Silva *et al.* (2021) afirmam que há um projeto de norma que trata do procedimento de execução do contrapiso autonivelante de gesso que determina que este material deverá estar endurecido em até 24 horas após a sua aplicação, pois

após este período o contrapiso deve ser liberado para execução da camada de revestimento.

Seguindo este critério, pode-se afirmar que todas as misturas atendem satisfatoriamente este valor, pois apresentam tempo de fim de pega menor que 24 horas. No entanto, deve-se avaliar em conjunto a resistência à compressão destas misturas neste período.

4.3.3 Calor de hidratação

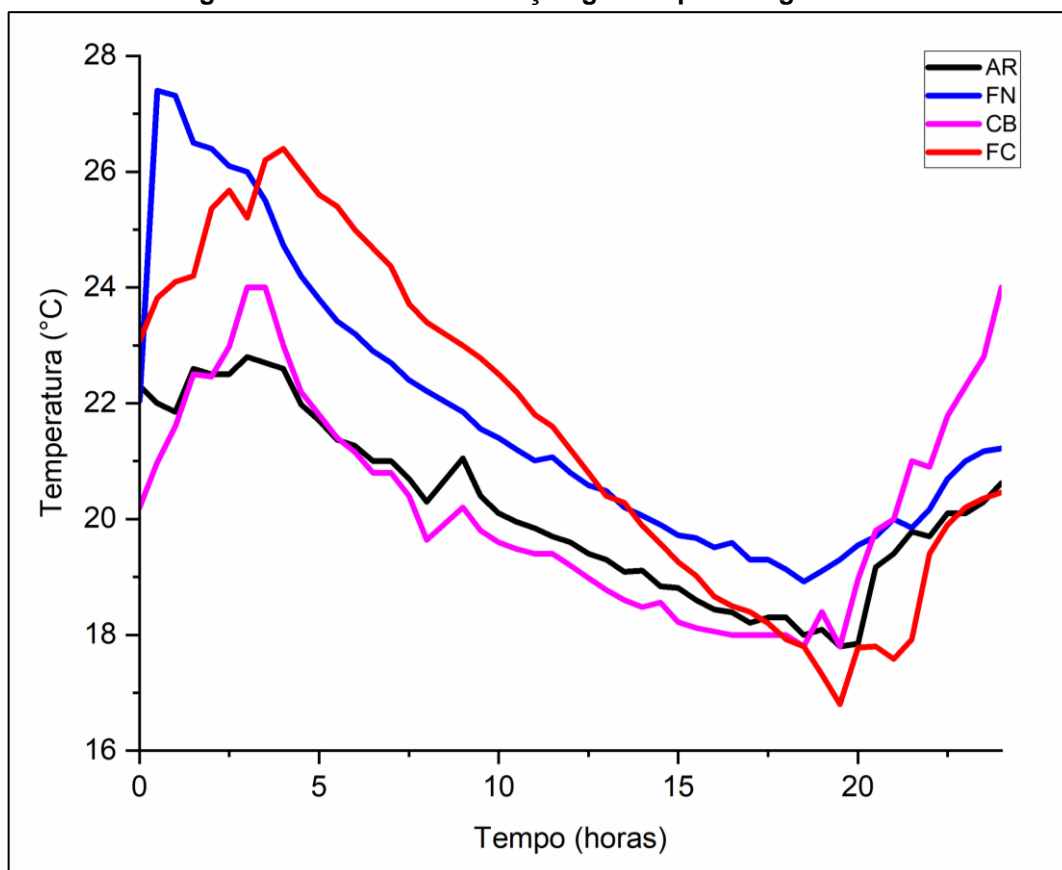
A variação da temperatura é uma forma de avaliar o efeito dos resíduos sobre as reações de hidratação do cimento nas misturas. As curvas representam a liberação de calor das pastas durante o processo de endurecimento, tendo em vista que o calor liberado é uma reação exotérmica. A Figura 62 apresenta o gráfico da variação da temperatura em função do tempo das quatro misturas, durante o período de 24 horas.

Entre todas as argamassas avaliadas, a FN foi a que liberou a maior quantidade de energia. A temperatura máxima atingida pela AR foi de 23,10 °C, pela CB foi 23,89 °C, pela mistura FN 27,65 °C e pela FC foi de 26,30 °C. Com relação à temperatura inicial das misturas, a AR apresentou elevação de 0,8 °C, enquanto a CB aumentou 2,19 °C, a FN 5,61 °C e a FC 3,76 °C.

Além disso, com o gráfico pode-se observar que a argamassa contendo fosfogesso natural é a primeira a atingir o pico de temperatura, o que está em conformidade com o ensaio de tempo de pega utilizando o aparelho de Vicat, onde foi verificado o menor tempo para o início de pega.

Para a cerâmica, resultados semelhantes foram encontrados nos estudos elaborados por Pereira e Camarini (2018), que indicaram que a substituição de 50% do cimento Portland por cerâmica vermelha não influenciou significativamente no processo de hidratação do cimento e, portanto, pode ser uma alternativa viável utilizando o calor de hidratação como parâmetro de avaliação.

Figura 62 - Calor de hidratação gerado pelas argamassas



Fonte: A autora (2021)

O resultado da curva do calor de hidratação da mistura FN comparada à FC é coerente com o observado por Schaefer (2013), que relata que a anidrita II (FC), obtida com temperatura de calcinação de 450 °C se hidrata mais lentamente em comparação a outros sulfatos de cálcio; como o fosfogesso natural, resultando em um deslocamento da curva para a direita.

4.4 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.4.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão das argamassas autonivelantes foi mensurada após 1, 7 e 28 dias do preparo. Para tanto, foram confeccionados 9 corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm para cada uma das quatro misturas definidas, sendo rompidos 3 para cada idade. Os resultados das médias das resistências estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados de resistência à compressão das argamassas estudadas

Argamassa avaliada	Resistência à compressão 1 dia (MPa)	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	Resistência à compressão 28 dias (MPa)
AR	28,99 ± 4,05	44,09 ± 4,78	53,68 ± 1,19
FN	0,92 ± 0,32	9,98 ± 1,37	10,83 ± 1,73
FC	0,65 ± 0,08	18,91 ± 2,80	23,11 ± 0,16
CB	8,88 ± 0,36	26,18 ± 0,41	32,66 ± 4,26

Fonte: A autora (2021)

Valores elevados de resistência são parâmetros tecnológicos chave em argamassas autonivelantes (YANG; ZHANG; YAN, 2016). Para fins de comparação dos resultados obtidos para a argamassa de referência, a norma C1708 (ASTM, 2019) apresenta resultados de ensaios interlaboratoriais.

O estudo denominado ILS N° 349 foi realizado com 5 réplicas de argamassas autonivelantes comerciais, nas idades de 1, 7 e 28 dias. A resistência média à compressão registrada nestes estudos com 1 dia foi de 21,76 MPa, com 7 dias 32,01 MPa e aos 28 dias 39,15 MPa. A AR utilizada no estudo apresentou resistência à compressão 33% maior que a da ILS com 01 dia e aproximadamente 37% maior aos 07 dias e 28 dias.

A análise dos resultados obtidos permite concluir que a adição dos resíduos influenciou nos resultados de resistência à compressão em todas as idades, conforme esperado, em razão da diminuição do consumo de cimento. Além disso, foi necessário aumentar as quantidades de água e aditivo superplastificante para atingir o espalhamento mínimo. Silva (2016) explica que o aumento da relação água/cimento reduz de forma considerável a resistência das argamassas pois o espaço ocupado pela água, que é consumida no processo de hidratação, torna-se um ponto frágil.

Dentre os resíduos estudados, a mistura CB foi a que obteve melhor desempenho nesta propriedade, apresentando resistência à compressão 65,25% menor em 1 dia, 40,62% menor em 7 dias e 34,46% menor após 28 dias, quando comparada à AR, conforme ilustrado no gráfico da Figura 63.

Além disso, os valores encontrados para a mistura CB assemelham-se aos obtidos por Mendes (2019) na mistura utilizando 50% de substituição da massa de cimento pelo resíduo do corte de mármore e graníticos. A autora obteve resistência à compressão de 8,34 MPa com 01 dia, 24,18 MPa aos 07 dias e 32,47 MPa com 28 dias.

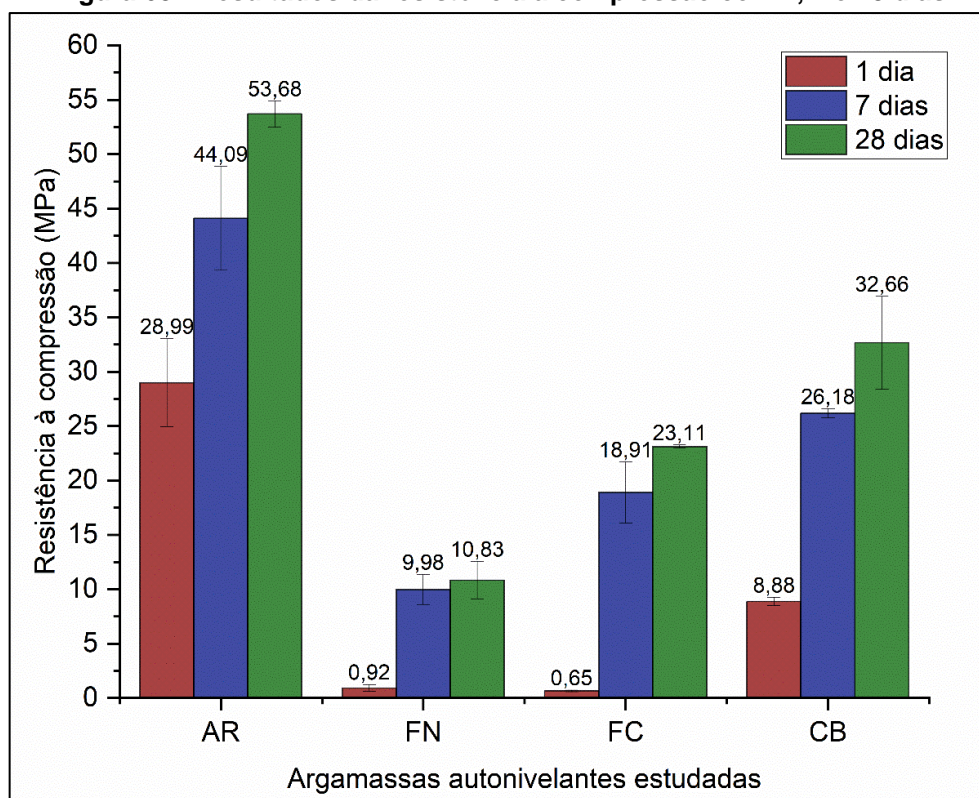
Observa-se, também, que a calcinação do fosfogesso (FC) influenciou pouco na resistência à compressão com 01 dia, porém apresentou resultados superiores nas análises com outras idades. Quando comparado à mistura com o fosfogesso sem tratamento (FN), a argamassa FC apresentou aproximadamente o dobro da resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

Estes resultados apontam que a calcinação do fosfogesso é benéfica, favorecendo melhores resultados aos 7 e 28 dias, e estão de acordo com os menores valores de índice de vazios e absorção de água listados na Tabela 25.

Tal fato também pode ser explicado pois os resíduos de fosfogesso natural e calcinado não possuem atividade pozolânica, desta forma os ganhos de resistência ocorrem posteriormente, devido ao efeito de preenchimento. Além disso, Gong *et al.* (2019) explicam que a utilização de fosfogesso calcinado é benéfica pois a dissolução da anidrita produz menos íons sulfatos que o fosfogesso natural, melhorando o desempenho das argamassas.

No entanto, conforme observado por Schaefer (2013), a anidrita é um sulfato de cálcio que possui taxa de dissolução lenta, explicando a obtenção de melhores resultados somente após 7 dias.

Figura 63 - Resultados da resistência à compressão com 1, 7 e 28 dias



Fonte: A autora (2021)

Yang, Zhang e Yan (2016) utilizaram em seus estudos a norma chinesa de argamassas autonivelantes, estabelecendo que a resistência à compressão com 01 dia não seja inferior a 6 MPa. De acordo com este parâmetro, as argamassas produzidas com fosfogesso natural e calcinado não atendem aos valores mínimos requeridos para as idades iniciais, pois o sulfato de cálcio e a presença de ácidos residuais no fosfogesso atrasam o início da hidratação (YANG; ZHANG; YAN, 2016).

Silva *et al.* (2021) relatam que no projeto de norma elaborado em 2019 que trata do procedimento de execução do contrapiso autonivelante de gesso há exigência de resistência à compressão mínima de 8 MPa. Para este critério, as argamassas FC e FN não atenderiam com a idade de 01 dia, mas estariam acima do limite aos 7 dias.

Para a resistência aos 28 dias, Barluenga e Hernández-Olivares (2010) recomendam que o valor mínimo seja de 10 MPa para contrapisos autonivelantes. Desta forma, todas as misturas produzidas podem ser aceitas e as misturas FC e CB atingem este valor já com 07 dias.

Nas argamassas à base de sulfato de cálcio, Schaefer (2013) recomenda que a resistência à compressão deve ser de 20 MPa aos 28 dias. Dentre as argamassas produzidas com o fosfogesso, apenas a FC atende ao valor mínimo de resistência nesta idade.

A fim de avaliar quanto os valores encontrados para resistência à compressão das argamassas estudadas diferem entre si foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA), com um nível de significância (α) de 5%, conforme Tabela 19.

Tabela 19 - Análise de variância da resistência à compressão

Variável	Soma dos quadrados			Graus de Liberdade			Estatística F			p-valor		
	1 dia	7 dias	28 dias	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
Tratamento	1595	1885,12	2949,36	3	3	3	127,43	49,77	192,00	4,31 .10 ⁻⁷	1,61 .10 ⁻⁵	8,62 .10 ⁻⁸
Resíduos	33,38	101,00	40,96	8	8	8						
Total	1628,37	1986,12	2990,33	11	11	11						

Fonte: A autora (2021)

Como $p\text{-valor} < \alpha$ ($p\text{-valor} < 0,05$) comprova-se a diferença entre as médias das resistências à compressão em todas as idades. Para analisar a magnitude da diferença entre as médias, fez-se uso do Teste de Tukey. Este teste foi utilizado para complementar a análise de variância, através de comparação entre todos os pares de médias, conforme Tabela 20.

Para o Teste de Tukey, considerando um nível de significância (α) de 5%, não há diferença significativa entre as médias das argamassas FC-FN com a idade de 1 e 7 dias, bem como nas argamassas CB-FC com 7 dias, pois $p\text{-valor} > 0,05$. Nas demais misturas, as médias são consideradas significativamente distintas, pois o $p\text{-valor}$ é $< 0,05$.

Tabela 20 - Teste de Tukey para resistência à compressão

Argamassas comparadas	Idade	Diferença	Limite inferior	Limite superior	p-valor
AR-FN	01 dia	-28.07	-33.41	-22.72	0.0000007
AR-FC		-28.34	-33.68	-22.99	0.0000007
AR-CB		-20.11	-25.45	-14.76	0.0000097
FC-FN		-0.27	-5.61	5.07	0.9983603
CB-FN		7.96	2.61	13.30	0.0061194
CB-FC		8.23	2.88	13.57	0.0050084
AR-FN	07 dias	-34.11	-43.40	-24.81	0.0000118
AR-FC		-25.18	-34.47	-15.89	0.0001118
AR-CB		-17.91	-27.20	-8.61	0.0012047
FC-FN		8.92	-0.36	18.21	0.0596687
CB-FN		16.20	6.90	25.49	0.0023185
CB-FC		7.27	-2.01	16.56	0.1331075
AR-FN	28 dias	-42.85	-48.77	-36.94	0.0000000
AR-FC		-30.58	-36.49	-24.66	0.0000009
AR-CB		-21.02	-26.94	-15.11	0.0000150
FC-FN		12.27	6.36	18.19	0.0007346
CB-FN		21.83	15.91	27.74	0.0000113
CB-FC		9.55	3.63	15.46	0.0037627

Fonte: A autora (2021)

4.4.2 Resistência à tração na flexão

Para os ensaios de resistência à tração na flexão foram produzidos 6 corpos de prova para cada mistura. Os valores de resistência foram determinados com 3 e 28 dias, sendo rompidos 3 corpos de prova por mistura em cada idade. As médias dos resultados obtidos encontram-se na Tabela 21.

Como a prensa hidráulica disponível para os ensaios não registrou com precisão os resultados após 24 horas, a primeira verificação de resistência foi efetuada aos 3 dias de idade.

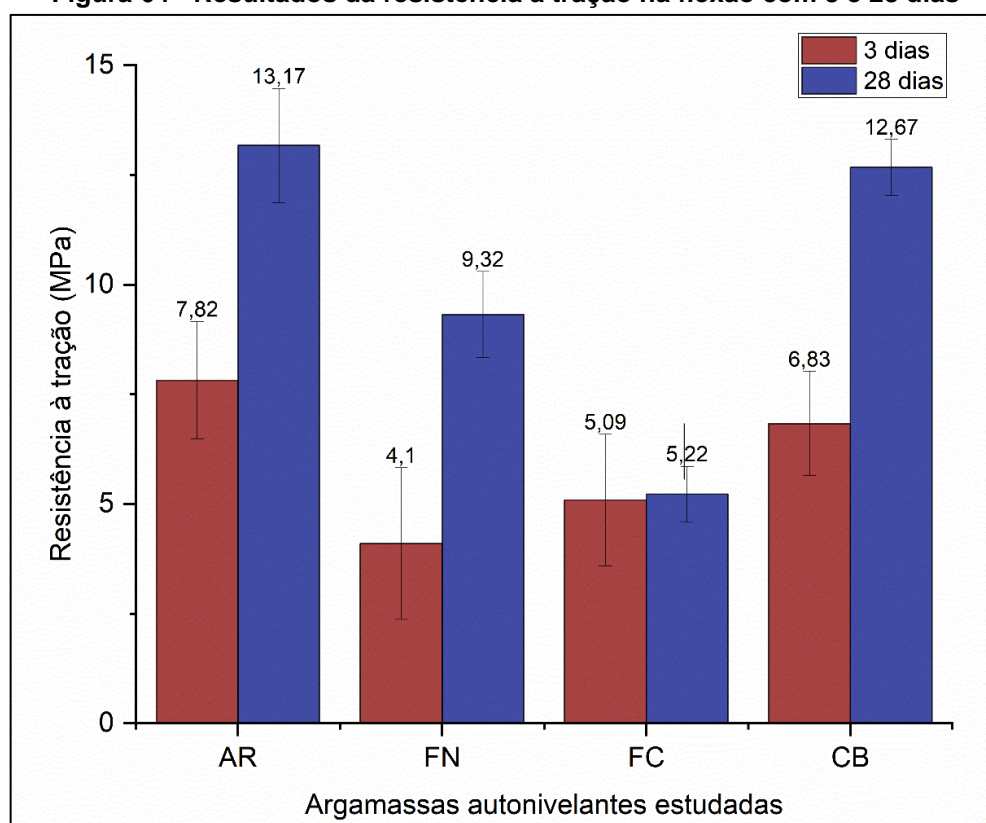
Tabela 21 - Resultados de resistência à tração na flexão das argamassas estudadas

Argamassa avaliada	Resistência à tração 3 dias (MPa)	Resistência à tração 28 dias (MPa)
AR	7,82 ± 1,34	13,17 ± 1,30
FN	4,10 ± 1,73	9,32 ± 0,98
FC	5,09 ± 1,50	5,22 ± 0,64
CB	6,83 ± 1,19	12,67 ± 0,64

Fonte: A autora (2021)

Assim como na resistência à compressão, a mistura produzida com o resíduo de cerâmica branca (CB) foi a que apresentou melhores resultados dentre os resíduos analisados. O valor alcançado para a resistência à tração da argamassa CB com 3 dias é apenas 13,00% menor que o resultado da argamassa AR e 3,8% menor aos 28 dias, conforme demonstrado nos gráficos da Figura 64.

Figura 64 - Resultados da resistência à tração na flexão com 3 e 28 dias



Fonte: A autora (2021)

O estudo denominado ILS N° 349 da norma C1708 (ASTM, 2019) realizado com 5 réplicas de argamassas autonivelantes comerciais indica resistência média à

tração na flexão de 4,45 MPa com 01 dia e 7,45 MPa com 7 dias. As argamassas não foram avaliadas nestas idades, no entanto os valores apresentam-se bastante coerentes.

Para esta propriedade, observou-se desempenho mais satisfatório do fosfogesso natural (FN) em comparação ao fosfogesso calcinado (FC) após 28 dias. De toda forma, as argamassas podem ser consideradas de alta resistência por apresentarem valores de resistência à tração maiores que 4 MPa, que é o limite mínimo prescrito na NBR 11801 (ABNT, 2012).

Esta norma apresenta os requisitos para argamassas de alta resistência mecânica de pisos. Além disso, Schaefer (2013) também recomenda que nas argamassas à base de sulfato de cálcio (fosfogesso) a resistência à tração na flexão deve ser de 4 MPa aos 28 dias.

No projeto de norma relatado por Silva *et al.* (2021), referente ao procedimento de execução do contrapiso autonivelante de gesso, é requerida uma resistência à tração na flexão mínima de 3 MPa. Desta forma, todas as argamassas avaliadas também atendem a este critério em todas as idades.

Foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) para os resultados de resistência à tração na flexão, para discutir quanto os resultados das misturas diferem entre si. Na Tabela 22 estão os valores encontrados.

Tabela 22 – Análise de variância da resistência à tração na flexão

Variável	Soma dos quadrados		Graus de Liberdade		Estatística F		p-valor	
	3 dias	28 dias	3 dias	28 dias	3 dias	28 dias	3 dias	28 dias
Tratamento	25,35	121,29	3	3	6,12	45,94	0,018117	2,18 .10 ⁻⁵
Resíduos	11,03	7,04	8	8				
Total	36,39	128,33	11	11				

Fonte: A autora (2021)

Assim como na resistência à compressão, os valores de p-valor também ficaram abaixo de 0,05 (p-valor = 0,018 aos 3 dias e 2,18.10⁻⁵ aos 28 dias), adotando um nível de confiança de 95%. Portanto, a análise estatística também foi complementada pelo Teste de Tukey, para realizar a comparação entre todos os pares de médias, conforme mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 – Teste de Tukey para resistência à tração na flexão

Argamassas comparadas	Idade	Diferença	Limite inferior	Limite superior	p-valor
AR-FN	03 dias	-3.72	-6.79	-0.65	0.0194316
AR-FC		-2.73	-5.80	0.33	0.0822377
AR-CB		-0.99	-4.06	2.07	0.7328111
FC-FN		0.99	-2.07	4.06	0.7346940
CB-FN		2.73	-0.34	5.80	0.0826423
CB-FC		1.73	-1.33	4.80	0.3352774
AR-FN	28 dias	-3.84	-6.29	-1.39	0.0045020
AR-FC		-7.94	-10.39	-5.49	0.0000301
AR-CB		-0.49	-2.94	1.95	0.9131918
FC-FN		-4.10	-6.55	-1.64	0.0030318
CB-FN		3.35	0.89	5.80	0.0101720
CB-FC		7.45	4.99	9.90	0.0000486

Fonte: A autora (2021)

A análise do Teste de Tukey permite concluir que aos 3 dias há diferença significativa entre os valores de resistência à tração na flexão apenas em relação à AR-FN, considerando um nível de significância (α) de 95%, pois p-valor é $< 0,05$. Já aos 28 dias, não há diferença significativa apenas na comparação entre AR-CB.

4.4.3 Retração linear

As alterações volumétricas que ocasionam retração ou expansão são decorrentes das reações de hidratação do cimento e da movimentação de água na mistura. A perda de água pode ocorrer para o meio externo ou devido ao consumo nas reações. A retração linear acima de valores estabelecidos ocasiona fissuras, que podem comprometer a durabilidade destes materiais.

O ensaio de retração linear foi realizado com todas as misturas, sendo produzidos 3 corpos de prova para cada, e os resultados estão resumidos na Tabela 24 e no gráfico da Figura 65. Considerou-se valores negativos para retração e valores positivos para expansão.

Dentre as argamassas avaliadas, foram identificados maiores valores de retração linear nas misturas contendo fosfogesso calcinado e sem tratamento, FC e FN, respectivamente, durante todo o período analisado. Para este parâmetro, nota-se que a calcinação do fosfogesso impactou de forma negativa, aumentando a retração das misturas.

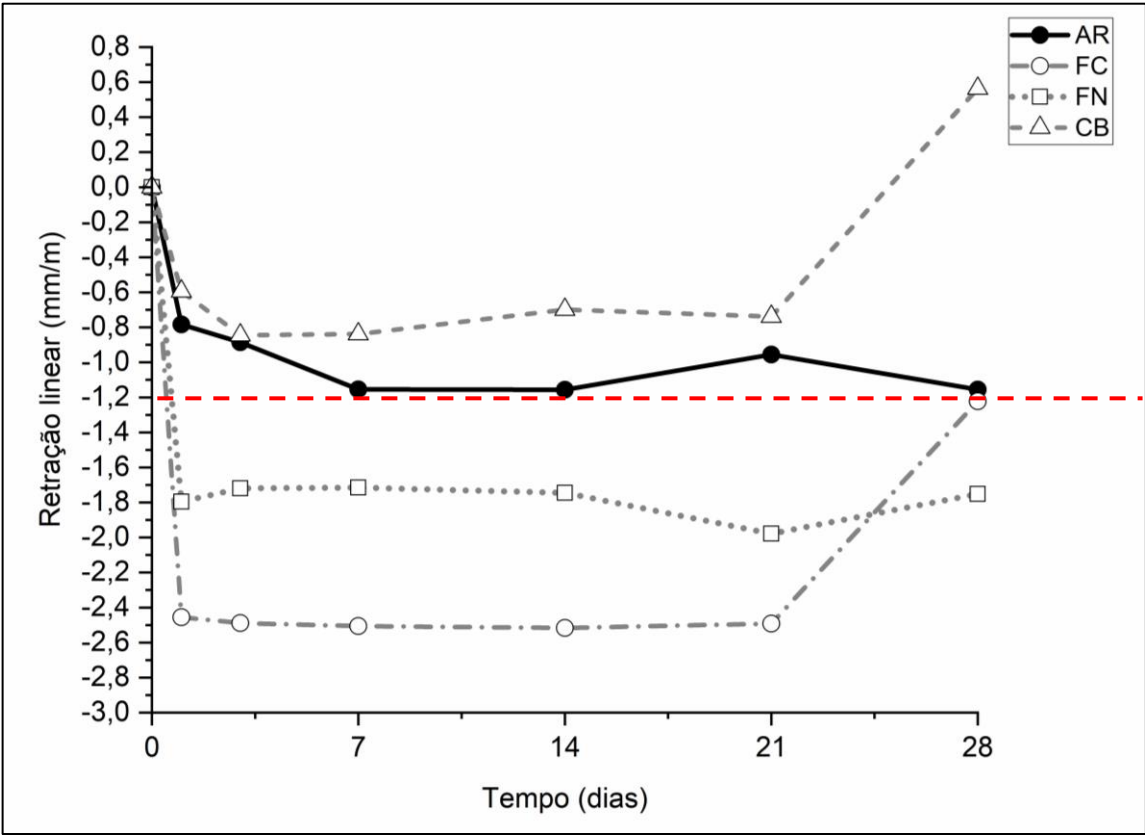
Tabela 24 – Resultados do ensaio de retração linear

Argamassa avaliada	Retração (mm/m)					
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
AR	-0,784	-0,886	-1,154	-1,156	-0,955	-1,155
FN	-1,796	-1,719	-1,715	-1,745	-1,978	-1,752
FC	-2,455	-2,489	-2,506	-2,517	-2,492	-1,222
CB	-0,595	-0,845	-0,838	-0,699	-0,738	+0,564

Fonte: A autora (2021)

Os valores de retração mensurados para as misturas AR e CB em todas as idades encontram-se abaixo do limite recomendado por Barluenga e Hernández-Olivares (2010), que é de 1,2 mm/m. O gráfico da Figura 65 permite a comparação entre os valores de retração encontrados. Nota-se que apenas as linhas definidas para a AR e CB encontram-se acima do limite estabelecido na literatura.

Figura 65 - Gráfico de retração linear



Fonte: A autora (2021)

A retração das argamassas com fosfogesso natural e calcinado nas idades iniciais pode ser justificada pela maior liberação de calor provocada por estes resíduos

na hidratação da pasta nas primeiras horas, conforme observado no gráfico do calor de hidratação da Figura 62.

As argamassas AR e CB apresentam menor liberação de calor, resultando em valores de retração menores. Schaefer (2013) também observou que pastas com maior liberação de calor foram aquelas que apresentaram maior fissuração. Segundo a autora, pode-se relacionar o desenvolvimento de calor à formação de etringita.

Onishi e Bier (2011) explicam que a retração que ocorre em misturas com o sulfato de cálcio tipo anidrita, que é obtida com a calcinação do fosfogesso (FC), ocorre devido à formação do monossulfato, além de etringita, nas primeiras horas de hidratação.

Além disso, Schaefer (2013) explica que a anidrita é um sulfato de cálcio com taxa de dissolução lenta, acarretando a formação de cristais com forma de longas e finas agulhas e que o tipo de sulfato de cálcio utilizado nas argamassas e a morfologia dos cristais de etringita tem relação com a estabilidade dimensional no estado endurecido.

Na mistura CB foi alcançado o objetivo de diminuição da variação dimensional em relação a AR, que possui grande consumo de cimento. Em contrapartida, para as misturas FN e FC não foi observada redução nos valores de retração, que pode também estar relacionada à granulometria do resíduo.

A granulometria não atuou como o esperado no preenchimento dos vazios, facilitando a movimentação da água para o meio externo e ocasionando a retração por secagem, conforme confirmado nos ensaios de índices de vazios e MEV, que indica superfície porosa nestas misturas.

Nas misturas CB e FN nota-se que há uma retração maior até os 21 dias, acompanhada de uma expansão após este período. Nawa e Horita (2005) explicam que este efeito pode ser causado pelas retrações química e autógena. Segundo os autores, quando a mistura se encontra no estado fresco ocorre a variação aparente de volume em decorrência da retração autógena, que acontece ao mesmo tempo da retração química. Com isso, após o desenvolvimento da hidratação dos grãos de cimento, há o aumento do volume de ar nos poros capilares.

4.4.4 Massa específica, índice de vazios e absorção de água

Foram determinadas a massa específica, índice de vazios e absorção de água aos 28 dias das quatro misturas de argamassas autonivelantes avaliadas, sendo produzidos 3 corpos de prova para cada. Os resultados médios encontrados estão na Tabela 25 e na Figura 66.

Tabela 25 - Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Argamassa avaliada	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)
AR	9,79 ± 0,13	20,32 ± 0,21	2,08 ± 0,01
FN	18,65 ± 0,34	32,33 ± 0,17	1,74 ± 0,02
FC	15,59 ± 0,29	28,65 ± 0,24	1,85 ± 0,01
CB	15,03 ± 0,15	27,34 ± 0,32	1,82 ± 0,03

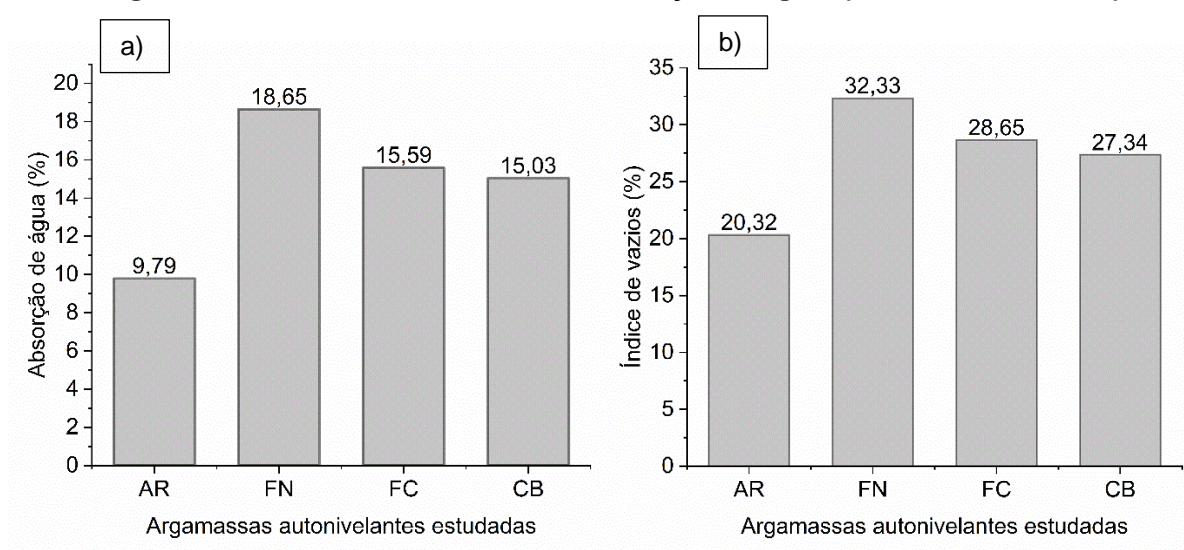
Fonte: A autora (2021)

A maior absorção de água mensurada foi da argamassa contendo fosfogesso natural (FN), bem como o maior índice de vazios. Para todas as argamassas com resíduos estudadas, a absorção de água e o índice de vazios foram maiores que os da argamassa de referência. As misturas FC e CB apresentaram valores similares para absorção de água, índice de vazios e massa específica, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 66.

O maior valor de índice de vazios observado foi na argamassa FN, pois este pode estar associado à morfologia das suas partículas, diminuindo o efeito de preenchimento dos vazios. No entanto, a baixa densidade verificada é benéfica na aplicação deste produto, tendo em vista que será mais leve (CARASEK, 2007), porém deve-se considerar que superfícies porosas estão mais suscetíveis ao ataque de agentes agressivos.

Como o teor de aditivo modificador de viscosidade é o mesmo em todas as argamassas avaliadas, este fator não foi considerado como motivador da incorporação de ar nas misturas.

Mendes (2019) encontrou valores de absorção de água de 9,87%, índice de vazios de 22,05% e massa específica de 2,58 g/cm³ para o traço com RCMG, inferiores aos resíduos estudados neste trabalho.

Figura 66 - Gráficos dos resultados de absorção de água a) e índice de vazios b)

Fonte: A autora (2021)

4.4.5 Resistência de aderência à tração

A determinação da resistência de aderência à tração foi realizada após 28 dias da aplicação das argamassas autonivelantes em um substrato de base cimentícia, a fim de simular a aplicação em obra. Os resultados médios de resistência encontrados estão listados na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração

Argamassa avaliada	Carga de ruptura média (N)	Resistência de aderência à tração média (MPa)
AR	3122	1,59
FN	810	0,41
FC	1519	0,77
CB	1295	0,66

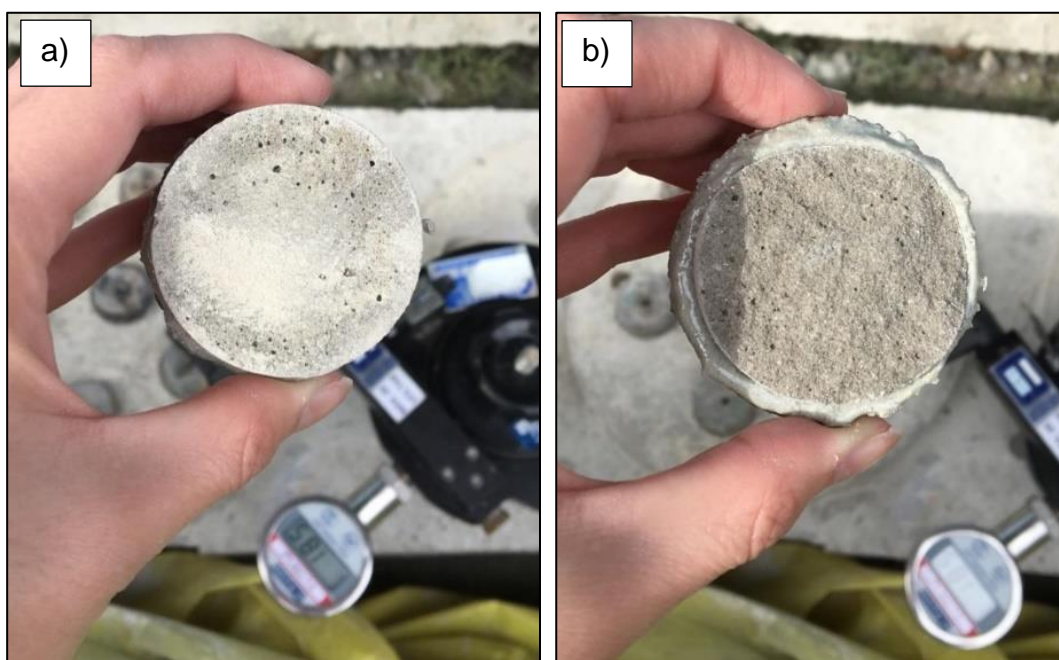
Fonte: A autora (2021)

Na realização do ensaio, foram anotadas as cargas e a forma de ruptura dos corpos de prova extraídos, sendo 12 para cada mistura. A forma de ruptura predominante foi na interface substrato/argamassa, conforme mostrado na Figura 67 a), com exceção de um corpo de prova da argamassa FN, que rompeu na argamassa e está ilustrado na Figura 67 b).

Além disso, foram descartados do conjunto de dados valores discrepantes da média e corpos de prova que romperam na cola, pois podem estar relacionados a problemas no processo de execução do ensaio.

O valor médio de resistência de aderência à tração obtido por Mendes (2019) encontra-se no intervalo dos valores mensurados neste trabalho. A autora obteve resistência média de 0,51 MPa aos 30 dias para o traço utilizando o RCMG.

Figura 67 - Formas de ruptura identificadas conforme a NBR 13528 (ABNT, 2019: a) Ruptura na interface substrato/argamassa e b) Ruptura na argamassa

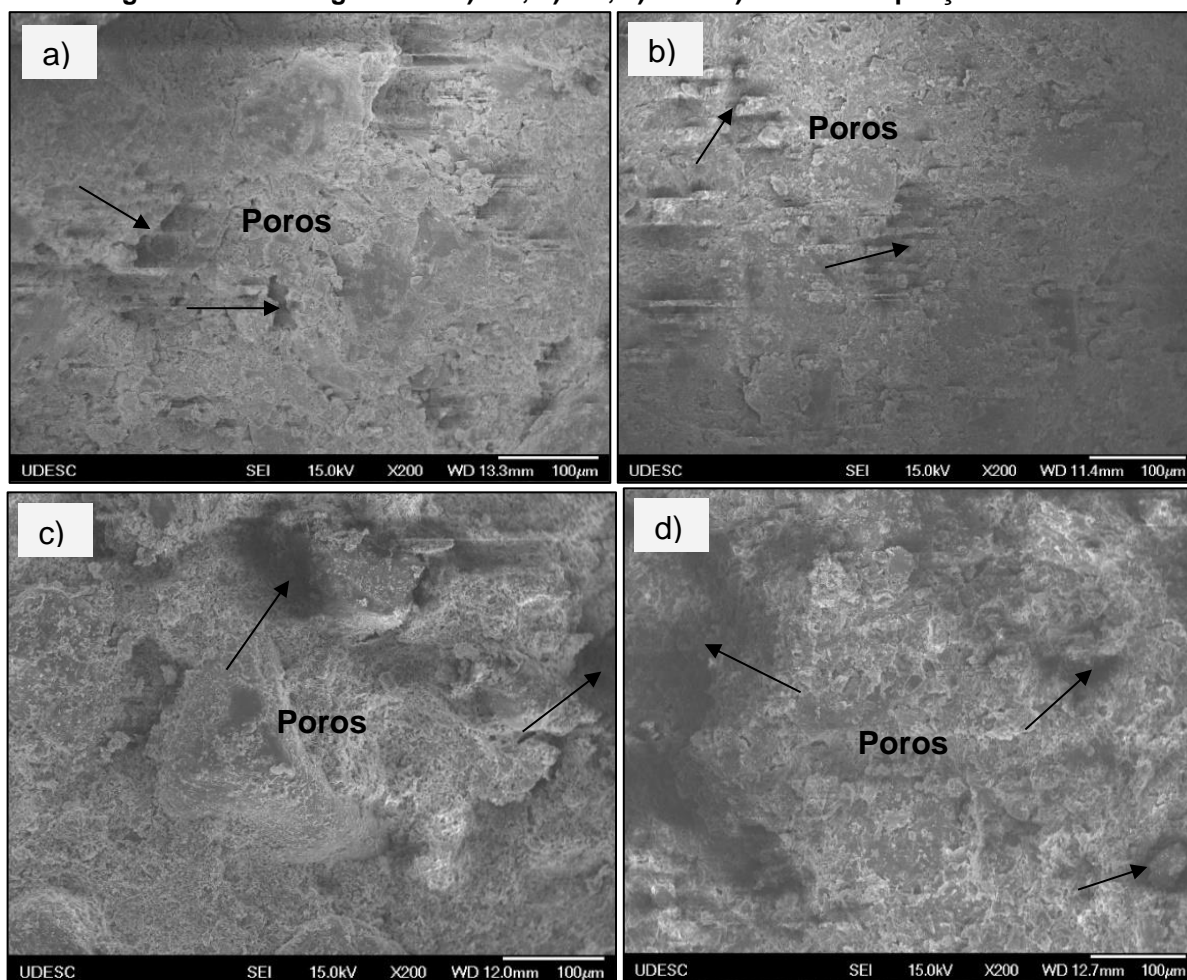


Fonte: A autora (2021)

4.4.6 Análise microestrutural

Foram coletados fragmentos das argamassas estudadas após 28 dias para análise da microestrutura. As imagens obtidas estão ilustradas nas Figuras 68 e 69.

Figura 68 - MEV argamassa a) AR, b) CB, c) FN e d) FC com ampliações de 200x

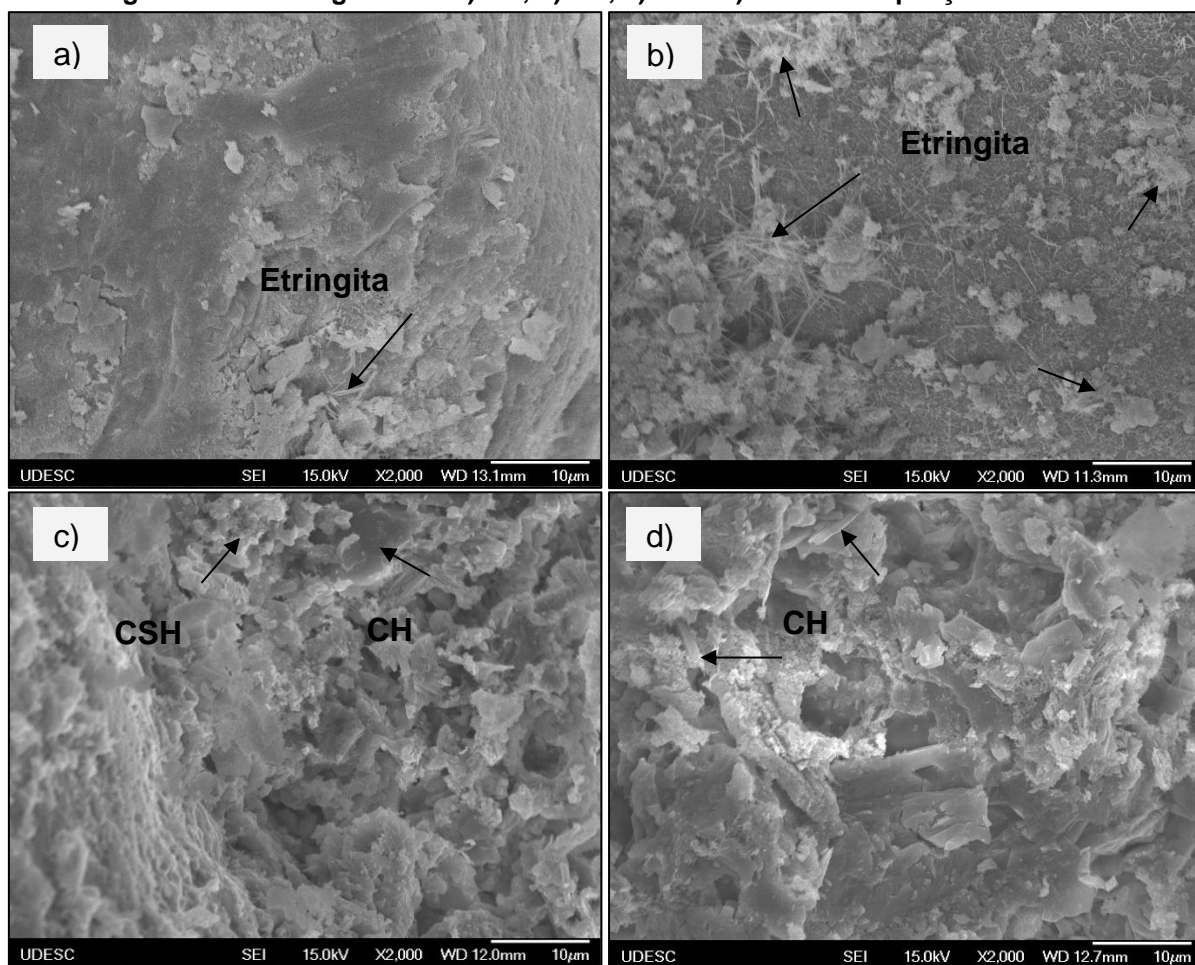


Fonte: A autora (2021)

Na Figura 68, com imagens ampliadas 200x pode-se identificar a presença de poros, identificados pelas áreas mais escuras. Observa-se que as misturas FN e FC, na Figura 68 c) e d), respectivamente, apresentam aspecto mais poroso e menos homogêneo que as demais, o que é confirmado nos resultados de absorção de água e índice de vazios. Além disso, pode-se relacionar a porosidade e menor homogeneidade das argamassas às menores resistências à compressão encontradas para estas misturas.

Neste trabalho, não é estudado o desenvolvimento da estrutura cristalina das misturas, no entanto na Figura 69 é possível observar visualmente alguns produtos da hidratação do cimento, que se formaram no processo de endurecimento da pasta. A análise visual das misturas AR e CB permite identificar a etringita pela morfologia acicular, em formato de agulha.

Figura 69 - MEV argamassa a) AR, b) CB, c) FN e d) FC com ampliações de 2000x



Fonte: A autora (2021)

4.4.7 Análise de custo e viabilidade

Foi realizado um estudo de custo das argamassas estudadas para verificar as diferenças em valores das misturas que utilizam os resíduos e avaliar a aplicabilidade financeira. Para os valores atribuídos para a areia, cimento e aditivo, foi utilizada a tabela de preços do SINAPI (2021), com última atualização no mês de junho/2021, listados na Tabela 27.

Os valores atribuídos para a água e energia utilizada para calcinação do fosfogesso foram baseados nas tarifas das companhias fornecedoras de água e de energia do município de Joinville/SC.

Não foi possível determinar os valores dos resíduos, pois estes podem ser comercializados ou não e o transporte depende da distância dos depósitos até a empresa que irá produzir o produto, tendo em vista que este é um material preparado industrialmente em centrais dosadoras. Portanto, no custo das argamassas estão

inclusos o cimento, areia, água e aditivos. Além disso, para a argamassa FC foi incluso o valor da calcinação.

Tabela 27 - Tabela de preços de acordo com o SINAPI

Código SINAPI	Descrição	Valor (R\$)	Unidade
00000366	Areia Fina - Posto jazida/Fornecedor (Sem transporte)	98,00	m ³
00001379	Cimento Portland Composto CP II-32	0,64	kg
00043618	Aditivo Superplastificante de Pega Normal para concreto	15,19	kg

Fonte: Adaptado de SINAPI (2021)

Com estes valores, determinou-se o custo de produção das argamassas autonivelantes por m², considerando espessura aproximada de 15 mm, listados na Tabela 28:

Tabela 28 - Custo por m² das argamassas estudadas

Argamassa	Custo (R\$/m²)
AR	8,91
FN	8,24
FC	8,22
CB	8,05

Fonte: A autora (2021)

A diferença entre a argamassa de referência e as demais misturas é devido ao valor do cimento, tendo em vista que é o insumo de maior valor da composição. Além disso, a diferença entre os demais resíduos é explicada pela demanda maior de aditivos químicos na mistura FN e pelo gasto de energia para a calcinação do fosfogesso na argamassa FC.

Sob o aspecto de viabilidade econômica, as argamassas que tiveram parte do cimento Portland substituída apresentaram menor custo, tendo em vista que o consumo deste é elevado na argamassa de referência e que corresponde à parcela considerável do custo final do produto. No entanto, deve-se ainda avaliar a disponibilidade dos resíduos por região e os custos com transporte destes materiais.

5 CONCLUSÕES

Considerando que a utilização de argamassas autonivelantes é uma prática relativamente nova no país e que há poucos estudos científicos envolvendo estes materiais, foram desenvolvidas misturas autonivelantes para contrapiso substituindo o percentual de 50% (em massa) de cimento Portland pelos resíduos de cerâmica branca e fosfogesso natural e calcinado à temperatura de 450 °C por 4 horas, resultando na forma de sulfato de cálcio denominada anidrita. Dos resíduos avaliados, apenas a cerâmica branca apresentou atividade pozolânica.

Nas dosagens das argamassas, o fosfogesso em seu estado natural comprometeu a trabalhabilidade e diminuiu o tempo de regeneração das misturas, necessitando de maiores quantidades de aditivo superplastificante para atingir o espalhamento mínimo de 125 mm, bem como ausência de segregação e exsudação. No entanto, a calcinação do fosfogesso mostrou-se benéfica para a fluidez e capacidade de regeneração das misturas.

Na análise dos tempos de início e fim de pega, o fosfogesso natural apresentou grande discrepância entre os tempos de início e fim de pega. No entanto o comportamento da argamassa produzida com anidrita foi similar à argamassa produzida somente com cimento (referência), pois a calcinação aumenta a área específica do fosfogesso e proporciona um endurecimento mais rápido. Diferente de todas, a mistura com cerâmica branca resultou em tempo de início de pega e endurecimento 28,85% menor que a AR.

Através da metodologia proposta, foram avaliadas as propriedades no estado fresco e endurecido. O comportamento mecânico das argamassas foi prejudicado pela adição dos resíduos, visto que demandaram maiores relações água/cimento (a/c) e quantidades de aditivo superplastificantes para atenderem aos requisitos de fluidez. No entanto, a mistura CB apresentou valores superiores aos estabelecidos na literatura em todas as idades estudadas (1, 7 e 28 dias).

A calcinação do fosfogesso influenciou pouco na resistência à compressão com 1 dia, quando comparado à mistura com fosfogesso natural. Porém, quando comparada à mistura com o fosfogesso sem tratamento (FN), a argamassa com anidrita (FC) apresentou aproximadamente o dobro da resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

Este resultado pode ser explicado já que estes materiais não apresentaram atividade pozolânica, ocasionando em ganhos de resistência posteriores devido ao efeito de preenchimento, pela dissolução da anidrita produzir menos íons fosfatos que o fosfogesso natural e devido à anidrita ser um tipo de sulfato de cálcio que possui dissolução lenta.

Na avaliação da resistência à tração na flexão, todas as misturas apresentaram desempenho superior à 4 MPa aos 28 dias, sendo classificadas como argamassas de alta resistência mecânica para pisos.

Quanto à retração, apenas a mistura produzida com o resíduo de cerâmica branca apresentou bom desempenho, resultando em valores dentro dos limites estabelecidos na literatura. A elevada retração nas misturas contendo fosfogesso tem relação com a maior liberação de calor nas horas iniciais, observada no calorímetro.

Outrossim, todas as misturas contendo resíduos apresentaram maiores valores de absorção de água e índice de vazios do que a AR, o que pode também ser observado na análise através de MEV. Especialmente para as misturas com fosfogesso observa-se maior porosidade, o que condiz com os valores de resistência à compressão encontrados.

Por fim, a análise de custo e viabilidade econômica indicam possível redução dos custos das argamassas autonivelantes com a utilização dos resíduos de cerâmica e fosfogesso natural e calcinado em substituição ao cimento Portland, pois este é o insumo de maior valor na composição das misturas. No entanto, é necessária uma análise da distância dos depósitos destes materiais e das centrais dosadoras para produção.

Diante dos resultados encontrados, observa-se que foram encontrados resultados satisfatórios para argamassas contendo os resíduos de cerâmica branca e de fosfogesso calcinado a 450 °C por 4 horas, originando a anidrita, indicando um potencial de utilização destes materiais em argamassas autonivelantes para contrapiso, reduzindo o consumo de cimento e promovendo uma destinação sustentável para estes resíduos.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho, foram observadas as seguintes sugestões para aplicação em trabalhos futuros:

- Estudar diferentes proporções de substituição dos resíduos nas misturas autonivelantes, bem como diferentes temperaturas e tempos de calcinação para o fosfogesso e a influência que exercem nas propriedades físicas e mecânicas;
- Avaliar as misturas autonivelantes com resíduos utilizando diferentes tipos de cimento (CP V ARI, Sulfoaluminoso...);
- Estudar a incorporação de fibras em argamassas com fosfogesso, para possível redução dos efeitos de retração;
- Aplicar ensaios de degradação e durabilidade, para avaliar a possibilidade de utilização em todos os ambientes;
- Quantificar os elementos radioativos presentes nos fosfogesso natural e calcinado nas misturas produzidas com estes resíduos;
- Avaliar, através da reometria rotacional, a reologia das misturas autonivelantes produzidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCERAM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, 2019. Disponível em: <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em: 17 nov. 2019.

ALVES, Kárita Christina Soares Kanaïama. **Estudo do fosfogesso tratado termicamente e de suas misturas com solo tropical**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás - UFG, Goiás, 2015.

AMORIM, Juliana Ruffato Resende. **Contrapiso de edifícios executado com argamassa fluída: parâmetros para desenvolvimento de projeto, execução de obra e controle da qualidade**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, 2015.

AQUINO, P. E. A produção de ácido fosfórico e a geração de fosfogesso, In: **Desafios Tecnológicos para o reaproveitamento do fosfogesso**. Anais eletrônicos. Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <http://www.fosfogesso.eng.ufmg>. Acesso em: 30 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5752**. Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7215**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11768**. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 11801**. Argamassa de alta resistência mecânica para pisos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12128**. Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 12653**. Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13528**. Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 13749**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13753**. Revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 15261**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575**. Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15823**. Concreto autoadensável. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16605**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16765**. Contrapiso autonivelante de gesso – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 16916**. Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C109/109M – 20a**. Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or 50 mm Cube Specimens. USA, 2020, 11p.

_____. **ASTM C157/157M – 17**. Standard Test Methods for Length Change of Hardened Hydraulic Cement Mortar and Concrete. USA, 2017, 8p.

_____. **ASTM C191 – 19**. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. USA, 2019, 8p.

_____. **ASTM C348 – 19**. Standard Test Methods for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars. USA, 2019, 6p.

_____. **ASTM C1708/C1708M – 19**. Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements. USA, 2016, 10p.

ATAIE, Feraidon F.; RIDING, Kyle A. Thermochemical pretreatments for agricultural residue ash production for concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 25, pp. 1703-1711, 2013. Disponível em: <http://web-b-ebsscohost.ez74.periodicos.capes.gov.br/ehost/detail/detail?vid=0&sid=1665331c-c7ee-4c23-866b-0f0e4f96dded%40pdc-v-sessmgr02&bdata=Jmxhbmc9cHQYnImc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=93647171&db=iih>. Acesso em: 05 mai. 2020.

BANFILL, Phillip, F. G. Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. **Construction and Building Materials**. [S.l.], v. 8, p.43-50, dez. 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.1994.08.008>. Acesso em: 25 abr. 2019.

BARROS, Mercia Maria Semensato Bottura de. **Tecnologia de produção de contrapisos para edifícios habitacionais e comerciais**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1991.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechela. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 6.

BRANCO, Alexandre Castelo; BRITO, Márcio. **Contrapiso Autonivelante**. 2º Caderno de casos de inovação na construção civil. Salvador: Câmara Brasileira da Indústria da Construção, 2014, 48p.

CABRAL, Stênio Cavalier; AZEVEDO, Marina Álvares de. Materiais alternativos para adição ao cimento Portland. **Revista Científica Vozes dos Vales**. Diamantina, v. 5, n. 10, pp. 1-16, 2016. ISSN: 2238-6424.

CANBAZ, Mehmet; TOPÇU, Ilker Bekir; ATESIN, Özgün. Effect of admixture ratio and aggregate type on self-leveling screed properties. **Construction and Building Materials**. [S.l.], v. 116, p.321-325, mai. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.084>.

CÁNOVAS, R.C.; MACÍAS, F.; PÉREZ-LOPEZ, R.; BASALOTTE, M.D.; MILLÁN-BECERRO, R. Valorization of wastes from the fertilizer industry: Current status and future trends. **Journal of Cleaner Production**. v. 174, p.678-690, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.293>.

CARVALHO, Henrique Duarte Sales. **Análise da Retração por Secagem em Argamassas Autonivelantes Utilizando Adições Minerais Como Substitutos Parciais do Cimento Portland**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CARASEK, Helena. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1º ed., 2007, 870p.

CHEN, Qiusong; ZHANG, Qinli; CHONGCHONG, Qi; FOURIE, Andy; XIAO, Chongchun. Recycling phosphogypsum and construction demolition waste for cemented paste backfill and its environmental impact. **Journal of Cleaner Production**. [S.l.], v. 186, p.418-429, mar. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.131>. Acesso em: 21 abr. 2020.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Resolução nº 147, 2013. Nível de isenção para o uso do fosfogesso na agricultura ou na indústria cimenteira. Rio de Janeiro, 2013. Acesso em: 03 abr. 2020.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Resolução nº 189, 2015. Nível de dispensa para uso do fosfogesso na construção civil. Rio de Janeiro, 2015. Acesso em: 03 abr. 2020.

COSTA, Eugênio Bastos da. **Aproveitamento de cinza pesada e lodo de anodização do alumínio para a produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DAMTOFT, J.S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E.M. Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research**. [S.l.], v. 38, p.115-127, set. 2008. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>. Acesso em: 25 abr. 2019.

DEGIRMENCI, N. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products. **Construction and Building Materials**. v. 22, p.1857-1862, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.024>.

DRANSFIELD, J. Admixtures for concrete, mortar and grout. In: **Advanced Concrete Technology Set**. v. 3, 2003, pp. 3-36.

EFNARC. **Guidelines for viscosity modifying admixtures for concrete**, 12 pp, 2006. Disponível em: efca.info/download/efnarc-efca-guidelines-for-viscosity-modifying-admixtures-for-concrete-guidelines-for-vma/. Acesso em: 05 mai. 2020.

FELEKOGLU, Burak; TOSUN, Kamile; BARADAN, Bulent; ALTUN, Akin; UYULGAN, Bahadır. The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. **Cement and Concrete Research**. [S.l.], v. 36, p.1719-1726, abr. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>. Acesso em: 10 jun. 2019.

FIORITO, Antonio J.S.I. **Manual de argamassas e revestimentos: Estudos e procedimentos de execução**. São Paulo: PINI, 2009.

FREITAS, Emilly Rachel Ferreira de; BORJA, Edilberto Vitorino de; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares dos; PEREIRA, Alexandre da Costa; VIANA, Joyce Soares. Estudo das Adições e Aditivos Minerais nas Propriedades de Argamassas Auto-nivelantes. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 5., 2010, Maceió. **Anais**. Natal: Connepi, 2010. 8p. Disponível em: <http://congressos.ifal.edu.br/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/1774/1030>. Acesso em: 10 ago. 2021.

GONG, Xiaokiang; LIU, Jiesheng; SUN, Zhengguang; LI, Faping. Effects of Phosphogypsum and Calcined Phosphogypsum Content on the Basic Physical and Mechanical Properties of Portland Cement Mortar. **Journal of Testing Evaluation**. [S.l.], mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/JTE20180380>. Acesso em: 03 abr. 2020.

HALICKA, Anna; OGRODNIK, Pawel; ZEGARDLO, Bartosz. Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. **Construction and Building Materials**. [S.l.], jul. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org.ez74.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.063>. Acesso em: 09 abr. 2020.

HAMOY, Luciana Biscaro. **Contrapiso autonivelante: uma proposta de sistema construtivo racionalizado para edificações**. 2017. 116p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

HARTMANN Carine; JEKNAVORIAN, Ara; SILVA, Denise; BENINI, Humberto. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, Geraldo Cechela. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 10, p. 347-380.

HIGASHIYAMA, Hiroshi; YAGISHITA, Fumio; SANO, Masanori; TAKAHASHI, Osamu. Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 26, pp. 96-101, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.008>. Acesso em: 28 abr. 2020.

HOLANDA, Fernando do Carmo; SCHMIDT, Holger; QUARCIONI, Valdecir Angelo. Influence of phosphorus from phosphogypsum on the initial hydration of Portland cement in the presence of superplasticizers. **Cement and Concrete Composites**. v. 83, pp. 384-393, 2017. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.029>. Acesso em: 28 abr. 2020.

HUA, S.; WANG, K.; YAO, X. Developing high performance phosphogypsum-based cementitious materials for oil-well cementing through a step-by-step optimization

method. **Cement and Concrete Composites**. v. 72, p.299-308, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.017>.

HYUNG, Wongil; HAN, Dongyeop; SEO, Dongyeon. Basic Properties of Non-Sintered Cement Mortar Using Industrial Byproducts as Activators. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**. [S.l.], v. 14, pp. 649-656, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3130/jaabe.14.649>. Acesso em: 18 abr. 2020.

ITAMBÉ. **Relatórios de ensaio**. Curitiba, fev. 2020. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=369>. Acesso em: 17 abr. 2020.

ITIM, Ahmed; EZZIANE, Karim; KADRI, El-Hadj. Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. **Construction and Building Materials**. [S.l.], v. 25, pp. 3603-3609, 2011. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.055>. Acesso em: 07 mai. 2020.

JOHN, Vanderley Moacyr; CINCOTTO, Maria Alba; SILVA, Maristela Gomes da. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: FREIRE, W.J.; BERALDO, A.L. (Ed). **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas: Unicamp, 2003. Cap. 6, p. 145-190.

JOHN, Vanderley Moacyr; CINCOTTO, Maria Alba. Capítulo 23: Gesso na construção civil. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. IBRACON, 2007.

JUAN, Andres; MEDINA, César; MORÁN, Julia M.; GUERRA, M. Ignacio; AGUADO, Pedro J.; ROJAS, Maria Isabel Sanchez de; FRÍAS, Moisés; RODRIGUEZ, Olga. Re-Use of Ceramic Wastes in Construction. **Ceramic Materials**. [S.l.], p. 197-214, 2010. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/ceramic-materials/re-use-of-ceramic-wastes-in-construction>. Acesso em: 16 abr. 2020.

JUENGER, M.C.G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J.L.; IDEKER, J.H. Advances in alternative cementitious binders. **Cement and Concrete Research**. [S.l.], v. 41, p. 1232-1243, 2011. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>. Acesso em: 17 jan. 2020.

KATSIADRAMIS, N.J.; SOTIROPOULOU, A.B.; PANDERMARAKIS, Z.G. Rheological and mechanical response modifications for a self-leveling mortar. **EPJ Web of Conferences**. [S.l.], v.6, jun. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100623002>. Acesso em: 22 abr. 2019.

KESHAVARZ, Zahra; MOSTOFINEJAD, Davood. Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete. **Construction and Building**

Materials. [S.l.], v. 195, 2019. Disponível em: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.033. Acesso em: 09 abr. 2020.

LASSEUGUETTE, E.; BURNS, S.; SIMMONS, D.; FRANCIS, E.; CHAI, H. K.; KOUTSOS, V.; HUANG, Y. Chemical microstructural and mechanical properties of ceramic waste blended cementitious systems. **Journal of Cleaner Production.** [S.l.], v. 211, p.1228-1238, 2019. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.240>. Acesso em: 02 abr. 2020.

LI, Nan; XU, Linglin; WANG, Ru; LI, Lin; WANG, Peiming. Experimental study of calcium sulfoaluminate cement-based self-leveling compound exposed to various temperatures and moisture conditions: Hydration mechanism and mortar properties. **Cement and Concrete Research.** [S.l.], v. 108, p.103-115, 2018. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.012>. Acesso em: 08 jun. 2019.

LÓPEZ, V.; LLAMAS, B.; JUAN, A.; MORÁN, J. M.; GUERRA, I. Eco-efficient Concretes: Impact of the use of White Ceramic Powder on the Mechanical Properties of Concrete. **Biosystems Engineering.** [S.l.], v. 96, p.559-564, 2007. Elsevier BV. Disponível em: 10.1016/j.biosystemseng.2007.01.004. Acesso em: 02 abr. 2020.

MARTINS, Eliziane Jubanski. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa auto-nivelante.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

MEDINA, C.; BANFILL, P.F.G.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I.; FRÍAS, M. Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste. **Construction and Building Materials.** [S.l.], v. 40, pp. 822-831, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.112>. Acesso em: 24 abr. 2020.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais. 2. ed. [S.l.]: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MELO, José Roberto de Souza. **A reciclagem de resíduos de cerâmica para utilização no processo de argamassa.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal do Pará. Belém, 2017.

MENDES, Gabriela Azambuja. **Dosagem de argamassa autonivelante com adição de resíduos do corte de mármore e graníticos: Análise das propriedades físicas e mecânicas.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2019.

MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal. Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechela. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 8, p. 261-309.

MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; CABRAL JUNIOR, Marsis. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**. [S.l.], v. 6, n. 2, p. 28-39, mar/abr. 2001. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876570b7f8c9d6e028b4643/pdf/ci-6-2-5876570b7f8c9d6e028b4643.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2020.

NARLOCH, Danielle Cristine; PASCHUK, Sergei Anatolyevich; CORRÊA, Janine Nicolosi; ROCHA, Zildete; MAZER, Wellington; TORRES, Catarina Alzira Montenegro; CLARO, Flávia Del; DENYAK, Valeriy; SCHELIN, Hugo Reuters. Characterization of radionuclides presente in Portland cement, gypsum and phosphogypsum mortars. **Radiation Physics and Chemistry**, [S.l.], v. 155, p.315-318, 2019. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.07.011>. Acesso em: 03 abr. 2020.

NAKAKURA, Elsa Hissae; BUCHER, Hans Roman Edmundo. Pisos Autonivelantes: Propriedades e Instalação. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2, 1997. **Anais do Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. 1997, 12p.

NAWA, T.; HORITA, T. Autogenous shrinkage of high-performance concrete. In: Otto Graf Journal. **Annual Journal on Research and Testing of Materials**, v. 16, 2005, University of Stuttgart, pp.193-202.

NUERNBERG, N. J.; RECH, T.D.; BASSO, C. Uso do gesso agrícola. **Boletim Técnico 122**. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A. (EPAGRI). Florianópolis, 2005.

OLIVEIRA, Maria Cecília; MAGANHA, Martha Faria Bérnils. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica branca e revestimentos**. São Paulo: CETESB, 2006. 90p. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2020.

ONISHI, Kouji; BIER, Thomas. Investigation into relations among technological properties, hydration kinetics and early age hydration of self-leveling underlayments. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 40, p.1034-1040, mar. 2010. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.004>. Acesso em: 21 mar. 2019.

OUMNIH, Safae; BEKKOUCH, Nadia; GHARIBI, El Kadir; FAGEL, Nathalie; ELHAMOUTI, Kamal; OUAHABI, Meriam. Phosphogypsum waste as additives to lime stabilization of bentonite. **Sustainable Environment Research**, [S.l.], p.29-35, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0038-z>. Acesso em: 18 abr. 2020.

PEREIRA, Raquel Ramos. **Incorporação do fosfogesso como substituto do gesso natural no processo de fabrico de Cimento Portland**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica) – Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2010.

PEREIRA, Valdir; CAMARINI, Gladis. Fresh and Hardened Properties of Self-Leveling Mortars with Porcelain and Red Ceramic Wastes. **Advances in Civil Engineering**. [S.l.], v. 2018, 11p, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/6378643>. Acesso em: 14 mar. 2019.

PILEGGI, Rafael G.; CINCOTTO, Maria A.; JOHN, Vanderley M. Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimento de argamassas. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**. [S.l.], v. 3, p.62-76, nov. 2006. Acesso em: 22 mar. 2019.

PINHO, Guilherme Macêdo. Viabilidade econômica do uso da argamassa autonivelante para contrapiso. **Revista Online IPOG Especialize**, Goiânia, v.1, n.10, 13p., dez. 2015. Disponível em: <https://docplayer.com.br/17978166-Viabilidade-economica-do-uso-da-argamassa-autonivelante-para-contra.html>. Acesso em: 16 jan. 2020.

PUERTAS, F.; GARCÍA-DÍAZ, I.; BARBA, A.; GAZULLA, M. F.; PALACIOS, M.; GÓMEZ, M. P.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v. 30, p.798-805, jun. 2008. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.003>. Acesso em: 02 abr. 2020.

RASHAD, A.M. Phosphogypsum as a construction material. **Journal of Cleaner Production**. v. 166, p.732-743, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.049>.

RIZWAN, Syed Ali; BIER, Tomas A. Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 27, p.398-403, ago. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.030>. Acesso em: 21 abr. 2019.

RUBIN, Ariane Prevedello. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: Análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

RUIZ, M.S.; TANNO, L.C.; JUNIOR, M.C.; COELHO, J.M.; NIEDZIELSKI, J.C. A indústria de louça e porcelana de mesa no Brasil. **Cerâmica Industrial**. [S.l.], v. 16, p.29-34, 2011. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657467f8c9d6e028b47a2/pdf/ci-16-2-587657467f8c9d6e028b47a2.pdf>.

SAHMARAN, Mustafa; CHRISTIANTO, Heru Ari; YAMAN, Ismail Ozgur. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. **Cement and Concrete Composites**. [S.l.], v. 28, p.432-440, jan. 2006. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003>. Acesso em: 22 abr. 2019.

SCHAEFER, Cecília Ogliari. **Valorização de fonte alternativa de sulfato de cálcio para a produção de argamassas autonivelantes**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

SCHAEFER, Cecília Ogliari; CHERIAF, Malik; ROCHA, Janaíde Cavalcante. Production of Synthetic Phosphoanhydrite and Its Use as a Binder in Self-Leveling Underlayments (SLU). **Materials**. [S.l.], v. 10, p. 958, ago. 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5578324/>. Acesso em: 02 abr. 2020.

SEIFERT, Severin; NEUBAUER, Juergen; GOETZ-NEUNHOEFFER. Spatially resolved quatitative in-situ phase analysis of a self-leveling compound. **Cement and Concrete Research**. [S.l.], v. 42, p.919-927, jul. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.012>. Acesso em: 20 abr. 2019.

SIEVERT, T.; WOLTER, A.; SINGH, N. B. Hydration of anhydrite of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{II}$) in a ball mill. **Cement and Concrete Research**. [S.l.], v. 35, p.623-630, 2005. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.010>. Acesso em: 20 abr. 2019.

SILVA, Sarah Honorato Lopes da. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

SILVA, Daniel Bruno Pinto; PONTES, Izabelle de Oliveira Cardoso; RODRIGUES, Mariana Tavares Jorge; LIMA, Nathan Bezerra de; PÓVOAS, Yeda Vieira. Pasta autonivelante de gesso para utilização como camada de contrapiso. **Ambiente Construído**. [S.l.], v. 21, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000200528>. Acesso em: 10 ago. 2021.

SINAPI – Índices da Construção Civil. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx#categoria_556. Acesso em: 10 ago. 2021.

SOUZA, Natalia Cerqueira de. **Análise de desempenho do contrapiso autonivelante em relação ao sistema tradicional**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

SPADOTTO, Claudio A.; RIBEIRO, Wagner C. **Gestão de Resíduos na Agricultura e Agroindústria**. Fundação de estudos e pesquisas agrícolas e florestais (FEPAF). São Paulo, 2006.

TECHNE. [S.l.]: PINI, 2012. Execução de contrapiso autonivelante industrial. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/192/artigo286998-1.aspx>. Acesso em: 08 jun. 2019.

TECHNE. [S.l.]: PINI, 2013. Planejamento - Contrapiso. Disponível em: <http://equipedeobra17.pini.com.br/construcao-reforma/59/contrapiso-calcule-a-quantidade-de-operarios-de-ferramentas-e-284537-1.aspx>. Acesso em: 08 jun. 2019.

TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, Said. Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete. **Materials and Structures**. [S.l.], v. 44, p.155-167, abr. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <https://link-springer-com.ez74.periodicos.capes.gov.br/article/10.1617/s11527-010-9616-6>. Acesso em: 09 abr. 2020.

TORKITTIKUL, Pincha; CHAIPANICH, Arnon. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement. **Cement and Concrete Composites**. [S.l.], v. 32, p.440-449, fev. 2010. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.004>. Acesso em: 09 abr. 2020.

TURK, Kazim. Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. **Construction and Building Materials**. [S.l.], v. 37, p.326-334, dez. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.081>. Acesso em: 11 abr. 2019.

YANG, Jiakuan; LIU, Wanchao; ZHANG, Lili; XIAO, Bo. Preparation of load-bearing building materials from autoclaved phosphogypsum. **Construction and Building Materials**. [S.l.], v. 23, p.687-693, 2009. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.011>. Acesso em: 30 abr. 2020.

YANG, Lin; ZHANG, Yunsheng; YAN, Yun. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar. **Journal of Cleaner Production**. [S.l.], v. 127, p.204-213, abr. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.054>. Acesso em: 08 jun. 2019.

ZHANG, Shupeng; XU, Xiaoxiao; MEMON, Shazim Ali; DONG, Zhijun; LI, Dongxu; CUI, Hongzhi. Effect of calcium sulfate type and dosage on properties of calcium aluminate cement-based self-leveling mortar. **Construction and Building Materials**. [S.l.], v. 167, p.253-262, fev. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.146>. Acesso em: 08 jun. 2019.