



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA - UEPB
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE – CCTS - CAMPUS VIII
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JEFERSON GOMES NUNES

**ESTUDO DE ARGAMASSA DE ALTA RESISTÊNCIA COM UTILIZAÇÃO DE
MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES.**

**ARARUNA - PB
2021**

JEFERSON GOMES NUNES

**ESTUDO DE ARGAMASSA DE ALTA RESISTÊNCIA COM UTILIZAÇÃO DE
MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES.**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof(a) Dra. Maria Adriana
de Freitas Mágero Ribeiro

**ARARUNA - PB
2021**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

N972e Nunes, Jeferson Gomes.
Estudo de argamassa de alta resistência com utilização de materiais cimentícios suplementares [manuscrito] / Jeferson Gomes Nunes. - 2021.
84 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2021.

"Orientação : Profa. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Argamassa. 2. Resistência dos materiais. 3. Tração. I.
Título

21. ed. CDD 691.5

JEFERSON GOMES NUNES

**ESTUDO DE ARGAMASSA DE ALTA RESISTÊNCIA COM UTILIZAÇÃO DE
MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES.**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Civil.

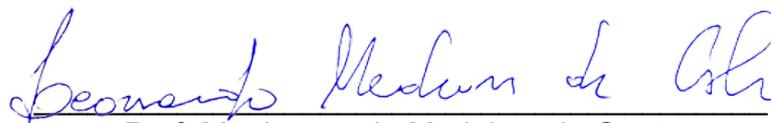
Orientador(a): Prof(a) Dr. Maria Adriana de
Freitas Mágero Ribeiro

Aprovada em: 13/10/2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof(a). Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Leonardo Medeiros da Costa
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Eng. Alice Oliveira Justo
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

AGRADECIMENTOS

Dedico primeiramente a Deus por sempre estar ao meu lado nos momentos bons e nos mais difíceis durante toda a minha vida.

Dedico a minha mãe Marly Gomes, que não se encontra mais presente nessa vida, mas que, onde ela estiver, estará orgulhosa de minha conquista; minha vó Jesuína que desejava muito me ver chegar onde estou agora, onde estiver sei que estará orgulhosa; ao meu irmão Junior e meu pai Josenaldo Nunes, que acompanhou meu crescimento e me ensinou a ser uma pessoa boa;

A minha prima Maria da Conceição que me ajudou na minha educação, me ensina a viver da melhor maneira possível, e que é um exemplo de garra e determinação para mim, a sua irmã Maria Cláudia e irmão Edmilsson que também admiro desde criança. A minha tia Carmenlúcia que também não se encontra mais presente, mas me acolheu como filho depois da perda da minha mãe.

A toda minha família e amigos que sempre estiveram presentes direta ou indiretamente em todos os momentos de minha formação. A William e Matteus, sócios, amigos e irmãos que estão comigo desde o início da graduação e que vamos enfrentar juntos essa nova fase de nossas vidas como empreendedores.

A todos os meus professores da graduação, que foram de fundamental importância na construção da minha vida profissional. Principalmente a Leonardo e Adriana que estão comigo nessa última jornada de minha graduação.

Agradeço especialmente aqueles que estavam presentes comigo ao longo de todo o curso, Alice, Suzane, Flávia, Mayrla, William, Matteus, Beatriz, Gustavo; aqueles que se tornaram minha nova família quando estava distante de casa, sempre dando apoio um ao outro, nunca deixando faltar nada principalmente nos momentos de dificuldades que enfrentamos durante o curso.

A todos que contribuíram para realização deste trabalho, meu MUITO OBRIGADO!

RESUMO

O cimento Portland é o material mais utilizado na construção civil, dentre os materiais cimentícios que podem ser fabricados com ele temos a argamassa. Sabe-se também que esses materiais são elementos frágeis, e contém propriedades de resistência à tração e deformações bastante inferiores. Diante disso tem se desenvolvido estudos para utilização de materiais que possam contribuir para melhorias nas propriedades desses materiais cimentícios. Esse estudo possui o objetivo principal avaliar o desempenho nos ensaios de índice de consistência, resistência a compressão e resistência a tração por compressão diametral de argamassas de alta resistência compostas da sílica ativa nas composições de 5%, 7,5% e 10% utilizada de forma individual, como também o comportamento da argamassa com a junção da sílica ativa com o metacaulim nas frações de 5% e 10%. Pode-se concluir ao que os traços confeccionados apenas com sílica ativa tiveram melhores resultados de resistência à compressão aqueles com frações de 5% e 7,5% em substituição em relação à massa do cimento, obtendo valores médios de 49,18 MPa e 48,33 MPa respectivamente. Da argamassa que combina sílica ativa e metacaulim comparando ambos os ensaios de resistência mecânicas pode-se concluir que a melhor composição tanto para compressão como para tração por compressão diametral, foi o traço com 10% de sílica ativa em adição e 5% de metacaulim em substituição, com valores médios de 31,37 MPa e 4,99 Mpa respectivamente. As argamassas com adição apresentaram resistência mecânica abaixo do valor obtido pelo traço controle, apesar disso, pode-se ainda assim afirmar que eles conseguem proporcionar uma boa resistência à argamassa no seu estado endurecido como também proporciona uma boa trabalhabilidade no seu estado plástico.

Palavras-Chaves: Argamassa. Resistência dos materiais. Tração.

ABSTRACT

Portland cement is the most used material in civil construction, among the cementitious materials that can be manufactured with it, we have mortar. It is also known that these materials are fragile elements, and have much lower tensile strength and deformation properties. Therefore, studies have been developed for the use of materials that can improve the properties of cementitious materials. This study has the main objective, evaluating the performance in tests of consistency index, compressive strength and tensile strength by diametrical compression of high-strength mortars composed of silica fume in compositions of 5%, 7.5% and 10% utilization individually, as well as the behavior of the mortar with the junction of silica fume with metakaolin in the 5% and 10% fractions. It can be demanded that the mixtures made only with silica fume had better compressive strength results than those with fractions of 5% and 7.5% in substitution in relation to the cement mass, obtaining mean values of 49.18 MPa and 48, 33 MPa respectively. From the mortar that combines silica fume and metakaolin, comparing both tests of mechanical strength, it can be concluded that the best composition for both compression and tension by diametrical compression, was the mix with 10% of silica fume in addition and 5% of metakaolin in replacement, with mean values of 31.37 MPa and 4.99 MPa respectively. Mortars with added mechanical strength below the value followed by the control trait, despite this, it can still be said that they can provide good mortar resistance in its hardened state as well as good workability in its plastic state.

Keywords: Mortar. Strength of materials. Traction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Aparelho usado na determinação de consistência da argamassa.....	40
Figura 02 – Ensaio de tração por compressão diametral.	41
Figura 03 – Tiras de madeiras utilizadas no ensaio de tração por compressão diametral.....	42
Figura 04 – Aferição do espalhamento da argamassa durante ensaio de IC.....	54
Figura 05 – Gráfico da Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.....	58
Figura 06 – Gráfico do índice de consistência das argamassas da primeira etapa de ensaios.....	59
Figura 07 – Gráfico do índice de consistência das argamassas da segunda etapa de ensaios com sílica ativa.	61
Figura 08 – Ensaio de índice de consistência da argamassa com sílica ativa.	62
Figura 09 – Expansão da argamassa contendo sílica ativa	64
Figura 10 – Sílica ativa peneirada na peneira de abertura 0,3 mm	64
Figura 11 – Gráfico do índice de consistência das argamassas da segunda etapa de ensaios com sílica ativa mais metacaulim.....	66
Figura 12 – Ensaio de índice de consistência da argamassa com sílica ativa e metacaulim.....	66
Figura 13 – Gráfico de Resistência à compressão das argamassas da primeira etapa de ensaios.....	70
Figura 14 – Gráfico de resistência à compressão das argamassas da segunda etapa de ensaios com uso apenas de sílica ativa.....	73
Figura 15 – Gráfico de resistência à compressão das argamassas da segunda etapa de ensaios com sílica ativa e metacaulim.	75
Figura 16 – Gráfico de resistência à compressão das argamassas da segunda etapa de ensaios com apenas sílica ativa x argamassa com sílica ativa mais metacaulim...75	
Figura 17 – Gráfico de resistência à tração das argamassas da segunda etapa de ensaios com sílica ativa e metacaulim.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.....	22
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Classificação da argamassa.....	20
Tabela 02 – Peneiras das séries normal e intermediária	27
Tabela 03 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	28
Tabela 04 – Funções, exigências e propriedades da argamassa	34
Tabela 05 – Classificação das argamassas por meio da retenção de água	37
Tabela 06 – Traços de referência da argamassa inicial.	49
Tabela 07 – Traços para comparação da argamassa inicial.	50
Tabela 08 – Traços para argamassa controle da segunda etapa de ensaios.	51
Tabela 09 – Traços para comparação da argamassa inicial da segunda etapa de ensaios com adição e substituição de sílica ativa com 5%, 7,5% e 10%.	52
Tabela 10 – Traços da argamassa para comparação na segunda etapa de ensaios com adição de sílica ativa e substituição de metacaulim.	53
Tabela 11 – Teor de umidade do agregado miúdo.....	56
Tabela 12 – Distribuição granulométrica do agregado.	57
Tabela 13 – Diferença de massa antes e depois do peneiramento.....	57
Tabela 14 – Análise da consistência da argamassa da primeira rodada de ensaios do grupo de controle	58
Tabela 15 – Análise da consistência da argamassa da primeira rodada de ensaios para comparação.	59
Tabela 16 – Análise da consistência da argamassa da segunda rodada de ensaios do grupo de controle.	60
Tabela 17 – Análise da consistência da argamassa da primeira rodada de ensaios para comparação.	60
Tabela 18 – Traços da argamassa para comparação com índice de consistência da segunda etapa de ensaios com adição de sílica ativa e substituição de metacaulim.....	65

Tabela 19 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da primeira etapa de ensaios.	69
Tabela 20 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de comparação da primeira etapa de ensaios com variação da granulometria e do aditivo.....	70
Tabela 21 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios.	71
Tabela 22 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda rodada de ensaios com sílica ativa.....	71
Tabela 23 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda rodada de ensaios com correção no DRM.	72
Tabela 24 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da primeira rodada de ensaios com correção no DRM.	72
Tabela 25 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios com adição de 5% de sílica ativa e substituição de 5% de metacaulim.....	73
Tabela 26 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios com adição de sílica ativa e substituição de metacaulim.....	74
Tabela 27 – Resistência à tração aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios.	76
Tabela 28 – Resistência à tração aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios com adição de sílica ativa e substituição de metacaulim.	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Água/cimento
AF ₂	Areia fina
AMF	Areia média fina
AMG	Areia média grossa
AN	Areia natural
ARI	Alta Resistência Inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
BC	Baixo colar de hidratação
C	Celsius
CP I	Cimento Portland sem adição
CP I - S	Cimento Portland com adição
CP II - E	Cimento Portland de alto forno
CP II - Z	Cimento Portland com material pozolânico
CP III	Cimento Portland de alto-forno
CP IV	Cimento Portland pozolânico
CP V	Cimento Portland de alta resistência inicial
CPB	Cimento Portland branco
CP(s)	Corpo(s) de prova
DRM	Desvio Relativo Máximo
g	Gramas
IC	Índice de Consistência
MC	Metacaulim
MCS	Materiais Cimentícios Suplementar
mm	Milímetros
Mpa	MegaPascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Associação Mercosul de Normatização
P	Plastificante
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
RS	Resistência a sulfato

SA	Sílica ativa
SiO ₂	Dióxido de Silício
SP	Super plastificante
SSS	Saturada Superfície Seca
TC	Traço Controle
µm	Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo geral.....	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	Argamassa	20
3.2	Componentes da argamassa.....	21
3.2.1	<i>Cimento Portland.....</i>	21
3.2.2	<i>Agregado miúdo</i>	23
3.2.2.1	<i>Propriedades dos agregados.....</i>	24
3.2.2.1.1	<i>Granulometria</i>	24
3.2.2.1.2	<i>Massa específica e massa unitária</i>	25
3.2.2.1.3	<i>Absorção de água e umidade superficial.</i>	25
3.2.2.1.4	<i>Composição Granulométrica.....</i>	26
3.2.2.1.5	<i>Forma e textura.....</i>	28
3.2.2.1.6	<i>Substância deletérias.....</i>	28
3.2.3	<i>Relação água/cimento.....</i>	29
3.2.4	<i>Aditivos plastificantes e superplastificantes</i>	30
3.2.5	<i>Materiais cimentícios suplementares (MCS).....</i>	30
3.2.5.1	<i>Sílica ativa</i>	32
3.2.5.2	<i>Metacaulin</i>	33
3.3	Principais características da argamassa.....	34
3.3.1	<i>Trabalhabilidade</i>	35
3.3.2	<i>Retenção de água.....</i>	36

3.3.3	<i>Resistência mecânica</i>	37
3.3.4	<i>Estabilidade volumétrica</i>	38
3.4	<i>Análise granulométrica</i>	38
3.4.1	<i>Peneiração</i>	38
3.5	<i>Preparo da argamassa</i>	39
3.6	<i>Índice de consistência</i>	39
3.7	<i>Ensaio de resistência da argamassa</i>	40
3.7.1	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	40
3.7.2	<i>Resistência à compressão</i>	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1	Materiais utilizados	44
4.1.1	<i>Cimento</i>	44
4.1.2	<i>Aditivo</i>	44
4.1.3	<i>Água</i>	44
4.1.4	<i>Agregado miúdo</i>	44
4.1.5	<i>Materiais cimentícios suplementares</i>	44
4.2	Métodos	45
4.2.1	<i>Definição do traço</i>	45
4.2.2	<i>Umidade do agregado miúdo</i>	46
4.2.3	<i>Granulometria do agregado miúdo</i>	46
4.2.4	<i>Preparo da argamassa</i>	46
4.2.5	<i>Dosagem</i>	49
4.2.6	<i>Índice de consistência</i>	53
4.2.7	<i>Cuidados com o corpo de prova</i>	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1	Umidade do agregado miúdo	56

5.2	Granulometria do agregado miúdo.....	56
5.3	Índice de consistência	58
5.4	Resistência mecânica	68
5.4.1	<i>Resistência à compressão.....</i>	<i>68</i>
5.4.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	<i>76</i>
6	CONCLUSÃO	78
	REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

Não é novidade que o cimento é o material da construção civil mais utilizado em todo o mundo. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2020), em setembro o volume de vendas de cimento teve um crescimento de 21,4% em relação ao mesmo mês no ano anterior, totalizando 5,8 milhões de toneladas.

Dentre os diversos materiais cimentícios temos a argamassa, que possui sua estrutura básica formada por uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerantes inorgânicos e água podendo ou não ter aditivo sendo utilizada em diversas situações, por sua facilidade de produção, desde o assentamento de blocos, até como componentes para reforço estrutural.

Também é conhecido que os materiais cimentícios geralmente são elementos frágeis e contém propriedades de resistência à tração e deformações bastante inferiores (Babak et al, 2014). A exemplo do concreto pode-se observar a adição de barras de aço para melhorar as propriedades onde esse material apresenta-se frágil.

Os problemas estruturais decorrentes da deterioração de construções que utilizam de materiais cimentícios, são facilmente vistos em jornais, uma vez que toda e qualquer edificação está sujeita à deterioração. Muitas vezes sinais que podem parecer simples rachaduras e manchas, são na maioria das vezes subestimados, o que pode acarretar com o desabamento da estrutura caso seja negligenciado.

A recuperação de estruturas danificadas, ainda que possível, é em sua maioria das vezes onerosa. Geralmente, as intervenções exigem que os materiais comprometidos sejam substituídos por outros, sendo esses mais duráveis e resistentes. Esses materiais, por sua vez, necessitam de mão de obra mais especializada e conhecimento qualificado a respeito de como esses elementos irão se comportar com relação aos outros materiais de construção e com o meio ambiente. (Morais, 2017; Reis, 2001; Van Balen et al, 2005).

Com o intuito de melhorar a durabilidade e permitir um aumento do desempenho de estruturas que são expostas aos mais diferentes meios, tem-se visto um crescente número de pesquisas para o desenvolvimento de aditivos e adições para materiais cimentícios, uma vez que as deficiências desses materiais podem intensificar ainda mais as patologias presentes, contribuindo para a interferência nos agentes internos que constituem o material (Scheidegger et al, 2019).

Com o intuito de combater os problemas relativos à durabilidade das construções, novos tipos de materiais e procedimentos foram surgindo com o objetivo de alcançar a durabilidade que se esperam para argamassas e/ou concreto (Martins, 2018). Destacando-se, nesse caso a utilização de materiais pozolânicos.

As pozolonas são classificadas em dois grupos quanto à origem, são elas naturais e artificiais. As pozolanas naturais são aquelas, como o próprio nome sugere, encontradas na natureza, incluindo nesse grupo alguns materiais de origem vulcânica e terras diatomáceas, não sendo exploradas comercialmente no Brasil. As artificiais são as que sofreram algum tipo de tratamento térmico como argilas e determinadas rochas contendo sílica, ou também aquelas que surgem como subprodutos de atividades industriais e agroindustriais, como por exemplo a cinza volante, cinza de casca de arroz, da casca de cana-de-açúcar, entre outros (Nita & John, 2007).

A reação de materiais pozolânicos como o hidróxido de cálcio, provoca melhoria na durabilidade da matriz cimentícia contra o ataque de espécies químicas ácidas devido a substituição do hidróxido de cálcio, que é solúvel em água, por silicatos de cálcio hidratados, evitando possíveis problemas de lixiviação. As pozolanas podem ser empregadas com o objetivo de reduzir o consumo de clínquer, e quando utilizadas junto com o cimento Portland baixam o calor de hidratação evitando possíveis fissurações (Massazza, 1993).

Pode-se denominar as argamassas que possuem suas propriedades melhoradas com adição de outras substâncias que não são comumente utilizadas, de ARGAD: Argamassa de Alto Desempenho. Sendo uma inovação tecnológica, com características melhoradas e permitindo a utilização nas mais variadas situações, podendo ou não diminuir o consumo de cimento (Santos, 2011).

Diante disso, nesse estudo foram desenvolvidas argamassas com adição de materiais com propriedades pozolânicas tanto em adição como em substituição em relação a massa do cimento e avaliadas seu desempenho no estado fresco, por meio do método de índice de consistência e também seu desempenho mecânico no estado endurecido através do ensaio de resistência a compressão e tração por compressão diametral.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de argamassas de alta resistência compostas do material cimentício suplementar a sílica ativa como também em conjunto com o metacaulim.

2.2 Objetivos específicos

- Definir sobre o uso de plastificante ou superplastificante;
- Verificar a influência da granulometria na resistência mecânica;
- Avaliar a influência de diferentes teores de metacaulim e sílica ativa;
- Verificar a trabalhabilidade das argamassas a parti do índice de consistência;
- Apresentar a resistência a compressão e à tração por compressão diametral.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Argamassa

Nos últimos anos, várias empresas substituíram a fabricação da argamassa em obra pelas pré-fabricadas, devido à dificuldade de estoque de materiais e dosagem no canteiro de obras, além das imprecisões que são observadas. E isso tem contribuído ainda mais para aumento do consumo desse material.

Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), argamassas são misturas homogêneas de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivo(s), com propriedades de aderências e endurecimento, podendo ser fabricadas em obras ou em instalações próprias (industrializadas).

A NBR 13530 (ABNT, 1995), classifica a argamassa em diversos tipos, isso porque ela pode ser utilizada em vários locais, nas mais diversas funções, cada um dos empregos, faz jus a uma série de propriedades que correspondem a um determinado tipo de argamassa em específico, ao qual podem ser citadas na Tabela 1

Tabela 01 – Classificação da argamassa

Critério de Classificação	Tipo
Natureza do aglomerante	Aérea e hidráulica
Função do revestimento	Chapisco, emboço e reboco
Tipo de aglomerante	Cal, cimento e mista
Propriedades especiais	Aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica, hidrófuga e termo isolante
Número de camadas de aplicação	Camada única ou duas camadas
Ambiente de exposição	Paredes internas, paredes externas, contato com o solo
Comportamento à radiação	Proteção isolante
Comportamento à umidade	Comum, permeabilidade reduzida, hidrófuga
Comportamento ao calor	Termo isolante

Tabela 01 – Classificação da argamassa (continuação)

Critério de Classificação	Tipo
Acabamento de superfície	Camurçado; chapisco; desempenado; imitação; travertino; lavado; raspado

Fonte: ABNT 13530 (NBR 1995) adaptado pelo autor (2021)

O desempenho das argamassas está condicionado a alguns fatores, que podem ser: aspereza (determinada em função da granulometria da areia), acabamento final (ondulações), resistência mecânica (oriunda dos materiais empregados), quantidade de água na mistura (elemento de grande importância) e a capacidade de absorver as movimentações naturais.

As argamassas geralmente são confeccionadas para resistir a baixos esforços de compressão, porém traços de 1:3 (cimento e areia) somados com água adequada para trabalhabilidade, podem proporcionar maiores resistência de compressão, chegando na ordem de 25 Mpa (Ribeiro et al, 2013).

Com base nessa informação, podemos citar diversos outros autores que utilizaram argamassas com traços fortes, como a exemplo: Quadros (2014), Silva & Libório (2005), Almeida (2007), Simão et al (2009), Gomes et al (2018); Filho (2013); Dutra (2015); Oliveira et al (2018). Dentre os trabalhos anteriormente citados, damos destaque a Oliveira et al (2018) que obteve bons resultados utilizando traço de areia próximo de 1 em relação ao cimento.

3.2 Componentes da argamassa

3.2.1 Cimento Portland

O Cimento Portland é o resultado de um processo de fusão parcial realizado a uma temperatura de 1500°C de uma mistura homogênea constituída de calcário (carbonato de cálcio) e de uma quantidade de argila ou xisto. Os primeiros cimentos de silicato de cálcio foram fabricados pelos gregos e romanos, eles foram os primeiros povos a descobrirem que se moessem as cinzas vulcânicas e misturasse com cal e água, produziriam uma argamassa endurecida, resistente a intempéries. Essa reação ficou conhecida como reação pozolânica (Moir, 2003).

O grande marco da história do cimento ocorreu em 1756, quando o inglês John Smeaton, obteve um produto resistente por meio da calcinação de calcário moles e argilosos. Em 1824, Joseph Aspdin, construtor inglês, queimou concomitantemente pedras calcárias e argila, resultando num pó fino. A mistura obtida, após secagem, tornava-se tão dura quanto os materiais empregados nas construções da época, além de não se dissolver em água. Esse produto foi patenteado com o nome de cimento Portland, por apresentar cor, durabilidade e solidez semelhante às rochas da ilha britânica de Portland (Moir, 2003; SNIC, 2006).

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento Portland é ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, no qual são adicionados, durante sua fabricação, uma ou mais formas de sulfato de cálcio na quantidade necessária e adições minerais nos teores estabelecidos por essa norma. Eles são designados pelo seu tipo, o que corresponde a adições utilizada na fabricação e de propriedades especiais, sendo identificados por suas siglas, acompanhadas de sua classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI), somados dos sufixos RS e BC, quando necessário, conforme podemos observar no Quadro 1.

Quadro 1 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo		
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25,32 ou 40 ^a	RS ^a ou BC ^b		
	Com adição	CP I-S				
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E				
	Com material carbonático	CP II-F				
	Com material pozolânico	CP II-Z				
Cimento Portland de alto-forno		CP III				
Cimento Portland pozolânico		CP IV				
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d			
	Estrutural	CPB	25.32 ou 40 ^c			

Cimento Portland branco	Não-estrutural	CPB	-	-
<p>^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais;</p> <p>^b O sufixo BC significa baixo colar de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais;</p> <p>^c As classes 25,35 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (Mpa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215;</p> <p>^d Cimento Portland de alta resistência inicial CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 Mpa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.</p>				

Fonte – ABNT 16697 (NBR 2018) adaptado pelo autor (2021).

3.2.2 Agregado miúdo

Os agregados compõem grande parte do volume total das argamassas, o que desempenha um grande papel no custo total do material cimentício, contribuindo na diminuição da retração das pastas constituintes de cimento e água, além de aumentar significativamente a resistência mecânica e ao desgaste superficial das argamassas (Ribeiro et al, 2013).

A NBR 9935 (ABNT, 2011) define agregado como material granular, habitualmente inerte, com propriedades e dimensões ajustadas para produção de argamassas e concretos. Como uma das principais funções podemos citar a redução do custo, uma vez que são materiais com custo inferior se comparados ao cimento, e ocupam volume significativo (Mehta & Monteiro, 2014). Além de contribuir tecnicamente com estabilidade dimensional e maior durabilidade, quando comparamos à pasta de cimento hidratada (Neville, 2016).

Levando em consideração a granulometria do material, podemos classificar o agregado, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005) em dois subgrupos:

- Agregado graúdo: que corresponde ao material com mínimo 95% em massa retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

- Agregado miúdo: que é o material granular com pelo menos 95% em massa passante na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Os agregados utilizados na argamassa têm que ser selecionados com muita cautela, já que eles representam aproximadamente 60% a 80% do consumo de materiais da argamassa pronta, em massa, resultando em considerável influência no seu comportamento no estado fresco, bem como no seu desempenho final (Carasek, 2010). O desempenho da argamassa também vai depender de sua aspereza, que por sua vez é determinada em função da granulometria do agregado e sua natureza mineralógica (Faria; Santos; Aubert, 2015; Sahmaran et al., 2009). Por essa razão a influência da composição granulométrica e de outras características das areias naturais em argamassas têm sido objeto de estudo ao longo do tempo. (Tristão, 1995; Carneiro, 1999; Tristão, 2005).

3.2.2.1 Propriedades dos agregados

3.2.2.1.1 Granulometria

A granulometria dos agregados pode interferir na porosidade da argamassa, aumentando o número de espaços vazios, afetando também no custo de produção, sem falar na capacidade e propriedades mecânicas. De modo geral, uma areia grossa gera uma mistura cimentícia mais áspera e com baixa trabalhabilidade enquanto as finas aumentam bastante o consumo de água, e por consequência aumenta o consumo de cimento, que é necessário para manter a relação água/cimento. Logo a utilização de agregados miúdos sem que seja definido uma granulometria ideal, podem gerar misturas argamassadas antieconômicas (Isaias, 2011).

Para obter uma mistura argamassada econômica, com boa trabalhabilidade e ainda produzir uma estrutura menos porosa é importante que o agregado miúdo tenha uma distribuição granulométrica equilibrada e é preferível que ela seja contínua. Existem diversas vertentes para classificar um agregado como ótimo, para Básilio (1995) a areia apresenta granulometria ótima quando apresenta uma mesma consistência e mesma relação água/cimento, obtém-se o menor consumo de cimento e atinja a resistência pretendida sem considerar a utilização de aditivos.

Menossi (2004) acredita que uma melhor granulometria seria aquela que gerasse o máximo de compacidade, entretanto isso requeria uma granulometria descontínua o que resultava na má trabalhabilidade do material, em seguida, foi verificado que a granulometria contínua seria a melhor opção para melhorar a trabalhabilidade das misturas cimentícias. Menossi (2004) ainda conclui que a granulometria contínua varia com a proporção cimento/agregado e que se deve utilizar a menor percentagem de finos que for possível.

3.2.2.1.2 Massa específica e massa unitária

Para o agregado miúdo é necessário levar em consideração o conceito de duas espécies de massas específicas: a massa específica real e a massa específica aparente. A massa específica real dos grãos é a massa por unidade de volume do material sólido, sem levar em consideração os poros permeáveis, os poros capilares e os vazios entre grãos; a sua determinação é feita por meio do picnômetro, da balança hidrostática e frasco de Chapman (Neville, 2016). A massa específica aparente é o peso da unidade de volume, que, ao contrário da massa específica real, levamos em conta os vazios permeáveis e impermeáveis que estão presentes nos grãos (NM 52, 2009; Neville, 2016).

A massa unitária é de grande importância na produção da argamassa, uma vez que é por meio dela que podemos transformar os traços de peso para volume e vice-versa, além de ser um dado bastante interessante para obter-se o consumo de material empregado por m³ de argamassa (Neville, 2016). Logo a massa unitária é a relação entre a massa e o volume, sem compactar, do agregado, incluindo o vazio existente entre os grãos. (NM 45, ABNT 2006).

3.2.2.1.3 Absorção de água e umidade superficial.

O agregado pode ser encontrado em diversos estados de umidade. Quando todos os poros permeáveis estão preenchidos e não existe nenhum filme de água na superfície, o agregado encontra-se na condição saturada superfície seca (SSS); quando o agregado se encontra saturado e também existe umidade livre na superfície, o agregado está na condição úmida ou saturada. (Mehta & Monteiro, 1994).

O conhecimento do teor de umidade é de extraordinária importância no estudo dos agregados miúdos. A presença de umidade no agregado necessita de correção das proporções reais da mistura: a massa de água que é adicionada a mistura cimentícia deve ser diminuída da umidade livre do agregado e a massa do agregado úmido deve ser aumentada de igual quantidade. Quando falamos de areia, devemos ficar atentos a presença de um segundo efeito que é o inchamento. Esse efeito trata-se do aumento de volume de uma dada massa de areia devido a presença de películas de água que deslocam as partículas tendendo a separá-las. Embora o inchamento não altere a quantificação dos materiais em massa, ele pode resultar na quantificação do volume, em uma menor massa de areia ocupando o mesmo volume (Neville, 2016).

O coeficiente de inchamento tem a função de medir o inchamento sofrido por uma massa de agregado. Esse coeficiente é dado pela relação entre o volume final úmido e o volume seco inicial. A umidade crítica é aquela a partir da qual o coeficiente de inchamento é considerado constante (Helene & Terzian, 1992).

3.2.2.1.4 Composição Granulométrica

É a distribuição das partículas dos materiais granulares divididas em várias dimensões, e é usualmente expressa em termos de porcentagens acumuladas maiores ou menores do que cada uma das aberturas de uma série de peneiras, ou até mesmo de uma porcentagem entre certos intervalos de abertura das peneiras (Mehta & Monteiro, 1994). A composição granulométrica possui influência na qualidade dos concretos, agindo na compactação e resistência (Helene & Terzian, 1992).

Expresso na NBR 7211 (ABNT, 2005), a dimensão máxima característica do agregado é a grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, expressa em milímetros, na malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

De uma maneira geral, quanto maior for a dimensão máxima característica do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume, que necessita ser coberta pela pasta de cimento, para uma determinada relação água/cimento (Mehta & Monteiro, 1994).

A NBR 7211 (ABNT, 2005) nos apresenta a definição de módulo de finura como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, e dividida por 100. A Tabela 2 apresenta a abertura de peneiras da série normal e intermediárias:

Tabela 02 – Peneiras das séries normal e intermediária

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
-	64 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	32 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: ABNT 7211 (NBR 2005) adaptado pelo autor (2021)

A distribuição granulométrica que segue os requisitos da NBR NM 248 (ABNT, 2003), deve atender aos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2005) como apresentado na Tabela 03 a seguir. Vale salientar que ainda pode ser usadas distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas pela norma, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

Tabela 03 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de manha	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	20	30	50
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTAS:

- 1- O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 2- O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20
- 3- O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte – NBR 7211/2005 Adaptada pelo Autor (2021).

Com auxílio do gráfico observa-se a interpretação de forma mais satisfatória do resultado da análise granulométrica. O mais comum é apresentar nas ordenadas as porcentagens acumuladas passantes e nas abscissas, as aberturas das peneiras em escala logarítmica.

3.2.2.1.5 Forma e textura

No caso do agregado miúdo, sua forma e textura superficial possui um efeito relevante sobre a demanda de água de amassamento da mistura (Neville, 2016).

3.2.2.1.6 Substância deletérias

São aquelas presentes como constituintes em pequenas quantidades no agregado miúdo, porém são capazes de prejudicar a trabalhabilidade, a pega e

endurecimento e as características da durabilidade do material cimentício (Mehta & Monteiro, 1994).

Existem três grandes categorias de substâncias deletérias que podem estar presentes em agregados, são elas: impurezas que atrapalham o processo de hidratação do cimento; películas que dificultam a aderência entre o agregado e a pasta de cimento hidratada, e algumas partículas específicas que são fracas ou instáveis (Neville, 2016).

3.2.3 Relação água/cimento

A água é um dos elementos importantes na produção de materiais cimentícios, visto que é ela que reage com o cimento, promovendo o endurecimento desse material. Por essa causa, um dos fatores que caracteriza a produção de argamassa é algo conhecido como relação água/cimento.

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2006) a relação água/cimento é a relação em massa entre o conteúdo efetivo de água e o conteúdo de cimento Portland, ou seja, é quantidade de água da mistura medida em relação à massa de cimento.

Essa relação além de interferir no comportamento da argamassa no estado fresco, também afeta as propriedades da argamassa endurecida, uma vez que após o endurecimento, ela precisa em sua maioria, de uma adequada retenção de água para que as reações químicas dos aglomerantes ocorram de forma adequada (Carasek, 2010). Logo chega-se à conclusão de que a relação água/cimento em massa das argamassas no estado fresco, pode ser tomada como variável que determina a resistência mecânica desse material cimentício (Selmo, 1989; Hanai, 1996).

Para esse estudo, a relação água/cimento (a/c) foi obtida com base em trabalhos anteriores. Conforme pesquisa realizada por Rao (2001), que analisou o acréscimo de resistência mecânica da argamassa com frações de sílica ativa variando de 0% a 30% em relação a massa do cimento e usando relação a/c de 0,35, 0,40, 0,45 e 0,50, durante as idades iniciais de 3 e 7 dias, conclui-se que a resistência mecânica das argamassas para qualquer relação entre água e cimento foi significativamente maior. Já no estudo levantado Oliveira et al (2018) os melhores

valores de resistência foram obtidos com relação a/c de 0,244 e 0,266 para idades de 7 dias.

3.2.4 Aditivos plastificantes e superplastificantes

Os aditivos químicos são elementos de bastante importância, principalmente se for considerado o momento em que se encontra a construção civil. As diversas soluções inovadoras que a engenharia civil vem implementando exigem que seus produtos possuam versatilidade quanto aos seus componentes e, nessa situação, os aditivos são responsáveis por modificarem as características dos sistemas, tanto no estado fresco como no estado endurecido. (Rixom & Mailvaganam, 2001).

Existem diversos tipos de aditivos, dos quais, conforme a NBR 11768 (ABNT, 2011), podem ser citados: plastificantes, retardadores, aceleradores, incorporadores de ar, superplastificantes, entre outros. Os mais utilizados são os aditivos que possuem função de redução do consumo de água; podem ser citados: os aditivos plastificantes, superplastificantes e polifuncionais. Cerca de 1,8 milhões de toneladas desse tipo de aditivos são comercializados anualmente (Gelardi et al, 2016).

O grande sucesso desses produtos é explicado devido a versatilidade que promovem às misturas em que são utilizadas. Os superplastificantes possibilitam uma redução de até 30% nos teores de água utilizada e/ou, no consumo de cimento Portland se dosado de forma correta. Contribuindo dessa forma, na formação de materiais com papel importante em relação à sustentabilidade e economia na produção de materiais cimentícios (Bastos, 2016).

3.2.5 Materiais cimentícios suplementares (MCS)

Tem crescido a busca por materiais com ação semelhante ao do cimento Portland que consiga substituí-lo mesmo que parcialmente. O que vem sendo procurado nestes materiais é a presença de atividade pozolânica, que ocorre quando há presença de sílica vítrea, em quantidades suficientes, que ao entrar em contato com a água pode se combinar com a portlandita CH (Ca(OH)_2), à uma temperatura ambiente, e formar Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), componentes com

propriedades cimentícias bastante similar ao que é formado durante a hidratação do cimento Portland, e Silicoaluminato de Cálcio Hidratado (C-A-S-H) (Martins, 2018).

A NBR 12.653 (ABNT, 2014), que trata de materiais pozolânicos, traz três classes para esse tipo de material, sendo elas: Classe N para as pozolonas naturais e artificiais, contemplando as argilas calcinadas, incluindo o metacaulim; classe C para cinza volante e materiais resultantes da combustão do carvão mineral e classe E para aqueles que não se enquadram na classe N ou C. A norma apenas não prevê o uso de pozolanas originadas de cinzas vegetais.

Esses materiais alternativos são conhecidos como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) e podem ser obtidos na forma de resíduos de outras indústrias: cinza volante – resíduo das termoelétricas a carvão; a sílica ativa – resíduo da produção de ferro silício; o metacaulim – resíduo da produção de papel, entre outros (Dal Molin, 2011; Mehta & Monteiro, 2014; Neville, 2016). Por serem materiais que podem ser aplicados em diversas áreas, aboliu-se o termo resíduos e passou a classificá-los como subprodutos. O uso deles ainda contribuem para diminuição do material depositado na natureza o que favorece a redução da poluição ambiental (Martins, 2018).

A adição de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) podem contribuir para reduzir o consumo de cimento, uma vez que, o cimento, por ser um material amplamente utilizado, sua fabricação gera impactos e danos à saúde desde a extração da matéria prima, que provoca degradação e alterações no ambiente natural próximo das fábricas e afetam também as áreas de mineração; a emissão de material particulado, que provoca muitos problemas à saúde humana; até o macro impacto que é gerado na fase de clínquerização, caracterizado pela emissão de gases que contribuem ao efeito estufa principalmente o dióxido de carbono (Maury & Blumeenschein, 2012).

Estudos apontam que os MCS não influenciam apenas nas características do estado endurecido dos materiais cimentícios, mas também influenciam de forma significativa nas propriedades do estado fresco, como na trabalhabilidade, atuando de forma positiva quando comparados a argamassas constituídos apenas por cimento Portland (Martins, 2018).

3.2.5.1 *Sílica ativa*

Ultimamente tem-se notado uma preocupação cada vez mais crescente com o meio ambiente por parte das indústrias, em função das exigências impostas pela sociedade e pelo governo. O problema do rejeito de materiais não surge apenas no modo como são retiradas as matérias-primas da natureza, mas também, na disposição inadequada dos resíduos gerados durante o processo e como são descartados no final da vida útil do produto.

É possível dar destaque a indústria da construção civil e estudiosos da área, que tem se aprofundado cada vez mais em pesquisas relacionadas ao reaproveitamento desses resíduos que antes seriam eliminados de qualquer forma na natureza, muitas das vezes em locais impróprios e com grandes riscos de contaminação do solo e fontes de água.

O reaproveitamento de resíduos na construção civil é visto com bons olhos, uma vez que sua utilização em cimentos, concretos e argamassas, pode, além de reduzir os custos envolvidos no processo de fabricação, melhorar algumas características desses materiais citados, como também seu desempenho (Kulakowski, 2002).

A sílica ativa é formada durante o processo de produção das ligas de ferro-silício e de silício metálico em fornos elétricos de redução, no qual, ocorre a formação de uma fumaça densa constituída por gases e pequenas partículas de sílica amorfa, contendo, em sua maioria, um teor de SiO_2 maior que 80%, o qual são chamados de sílica ativa (Kulakowski, 2002).

Logo, esse subproduto, que é considerado indesejável pelas indústrias de processamento de ligas, podem ser bem úteis na indústria da construção civil, uma vez que seu tamanho bem reduzido (alta superfície específica) e alto teor de sílica amorfa o torna um excelente material pozolânico (Kulakowski, 2002).

A sílica ativa passou a ser utilizada na indústria da construção civil, fazendo parte como material suplementar ao cimento e na composição de concretos e argamassas. A princípio era utilizada no cimento com o objetivo de reduzir os custos, substituindo parte do cimento utilizado na confecção dos materiais cimentícios (Maage e Sellevold, 1987). Porém, a sílica ativa vem sendo empregada como elemento para melhorar o desempenho de durabilidade e aumentar as propriedades mecânicas

através da adição em relação a massa do cimento. O uso conjunto de sílica ativa e aditivos superplastificantes, além da baixa relação água/aglomerante ajuda a melhorar as propriedades dos materiais cimentícios. (Litvan & Meyer, 1986)

Deve-se destacar também que a sílica ativa possui uma vantagem ambiental e econômica em relação às demais adições, sem levar em conta o aspecto logístico que é inerente a todos os produtos. Quando comparada as pozolanas naturais, como o metacaulim por exemplo, a sílica apresenta vantagem de não possuir custo agregado do consumo de energia para extração, queima e moagem, além do custo gerado pelo impacto ambiental proporcionado pela extração da matéria prima na jazida (Kulakowski, 2002).

Alguns trabalhos têm mostrado bons resultados na utilização desse MCS em argamassas. Nos estudos Dal Molin e Schuler (1993) a adição de SA, resultou em um aumento de 15% na resistência à compressão da argamassa com teores na faixa ente 0% e 10%.

3.2.5.2 *Metacaulin*

Dos materiais pozolânicos, o metacaulim é o material resultante da calcinação de argilas cauliníticas a temperatura que variam entre 500 °C e 800 °C (Souza; Dal Molin, 2002) ou como resíduo industrial de celuloses que fazem o branqueamento de papel (Teodoro, 2016). Devido às suas características pozolânica, ou seja, quando entram em contato com a portlandita, que é resultado da hidratação das partículas presente no cimento, em conjunto com a água produz silicato de cálcio hidratado (Coleman; Mcwhinnie, 2000), condicionando, desse modo, à matriz cimentícia um aumento na durabilidade e na resistência.

Além de melhorias nas propriedades mecânicas e físicas, a utilização do metacaulim se alinha com postura de práticas construtivas sustentáveis, uma vez que, na sua produção é liberado menos dióxido de carbono se comparado com a produção de cimento Portland, e também pela menor absorção de CO₂ durante a carbonatação das argamassas (Velosa et al, 2009)

Passos et al. (2018) caracterizou diferentes tipos de metacaulins, ficando evidente que existe uma gama de variedades desse material disponível para uso

como MCS, além disso, foi evidenciado que diferentes características químicas podem produzir contribuições distintas ao compósito.

Shannag (2000) verificou que certas combinações de sílica ativa com pozolana natural podem melhorar a resistência à compressão das argamassas, alcançando valores maiores do que utilizadas de forma separadas. Logo em alguns traços de argamassas desse estudo foram desenvolvidos combinações de sílica ativa e metacaulim, sendo essa última considerada uma pozolona natural processada (Abrão, 2019).

Silva et al (2018), verificou em seus estudos que a substituição parcial do cimento no concreto pelo metacaulim comprovaram melhorias nas propriedades do material endurecido, se comparados quando utilizado em adição em relação a massa do cimento.

Além disso, trabalhos como Mattos (2019), Mota et al (2016), Souza et al (2016) e Júnior et al (2012), tem mostrado que as frações de 5% e 10% de metacaulim tem contribuído para melhores resultados de argamassa em resistência mecânica.

3.3 Principais características da argamassa

É importante destacar que as propriedades das argamassas só podem ser avaliadas como um todo se for levado em consideração a sua interação com o material com o qual ela está em contato, uma vez que elas apresentarão comportamento diferente quando aplicadas sobre materiais distintos (Carasek, 2010). Na Tabela 04 podem ser observadas as principais propriedades requeridas da argamassa em cada um dos usos mais comum para ela.

Tabela 04 – Funções, exigências e propriedades da argamassa

Uso	Funções/Exigências	Propriedades
Assentamento estrutural	Resistir a esforços mecânicos, unir os elementos da alvenaria e vedar juntas	Trabalhabilidade; retenção de água; resistência mecânica inicial; resistência mecânica final, estabilidade volumétrica; C.A.D.
Assentamento convencional	Unir os elementos da alvenaria e vedar juntas	Trabalhabilidade; retenção de água; resistência mecânica inicial; estabilidade volumétrica, C.A.D.

Tabela 04 - Funções, exigências e propriedades da argamassa (continuação)

Uso	Funções/Exigências	Propriedades
Assentamento de acabamento	Unir elementos de acabamento ao substrato	Trabalhabilidade; retenção de água; aderência, estabilidade volumétrica; C.A.D.
Chapisco	Unir camadas de revestimento ao substrato	Trabalhabilidade e aderência
Emboço	Vedar alvenaria, regularizar superfície e proteger o ambiente de intempéries.	Trabalhabilidade, retenção de água, aderência, estanqueidade; estabilidade volumétrica.
Reboco	Vedar o emboço, ou seja, acabamento	Trabalhabilidade; aderência; estabilidade volumétrica.

(*) – C.A.D Capacidade Absorver Deformação

Fonte - Martinelli (1991) adaptado pelo autor, 2021.

Observa-se na Tabela 04 que existem dois grandes grupos para a argamassa, o de assentamento e o de revestimento e que algumas propriedades são exclusivas de cada grupo o que acaba por distingui-los, como a exemplo: resistência mecânica e C.A.D versus aderência. Já outras propriedades são mais indistintamente requeridas para argamassas independente da função que esteja exercendo, sendo elas: a trabalhabilidade; a retenção de água e a estabilidade volumétrica.

Além dessas funções para a argamassa, ela pode ser usada como material para reparo de estruturas de concreto. Mas para isso ela deve atender alguns requisitos de desempenho como: retração, compatibilidade, tecnologia utilizada, fluidez, impermeabilidade, resistência, função, além da durabilidade (Schueremans et al, 2011; Shannag, 2000).

3.3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é um conceito bem subjetivo que pode ser entendido como a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que as argamassas podem ser manuseadas, misturadas, transportadas, aplicadas e acabadas (Carasek, 2010).

Essa propriedade depende muito da tarefa que pretende ser executada, pois suas características estão ligadas às funções a serem desempenhadas. Por exemplo: uma mesma argamassa ao ser utilizada em revestimento deverá apresentar uma trabalhabilidade diferente daquela a ser aplicada para assentamento de alvenaria de pedra, o que por sua vez, apresenta um comportamento diferente daquele exigido de uma argamassa para assentamento de alvenaria de blocos cerâmicos (Recena, 2012).

A mudança de trabalhabilidade está sempre ligada a quantidade de água usada no preparo, desde que exista uma quantidade ideal de material aglomerante e de agregado miúdo, que seja capaz de reter a água utilizada na mistura, garantindo desse modo a estabilidade do volume e coesão necessária para promover aderência sem provocar a segregação dos materiais (Recena, 2012).

O excesso de água de uma argamassa, pode provocar o rompimento da coesão, tornando-a fluida, entretanto menos trabalhável, justamente pela perda da coesão, tornando o material inútil para a função a que se destina. Já uma argamassa que apresenta grande coesão, porém de baixa fluidez, apresentará, da mesma forma, comprometimento de sua trabalhabilidade. Logo trata-se a trabalhabilidade como a correta interação entre dois conceitos: consistência e coesão (Recena, 2012).

Segundo Amthauer (2001), a trabalhabilidade pode ser correlacionada com a consistência, que são elas, a seca, a plástica ou a fluida. O que irá determinar cada uma delas será a pasta que envolve os grãos dos agregados e, como já dito anteriormente, não se pode definir uma como melhor que a outra, visto que irá depender da finalidade a que é destinada.

3.3.2 Retenção de água

A retenção de água é a capacidade que uma argamassa detém de liberar, de forma gradual, a água utilizada para seu preparo para o meio ambiente ou para substratos porosos (Recena, 2012). Sabbatini (1986) afirma que é a capacidade que a argamassa tem de reter a água da mistura quando em contato com material de alta sucção, e que essa capacidade está relacionada com tensão superficial da pasta aglomerante. A retenção de água pode afetar também as propriedades da argamassa

no estado endurecido, como a aderência, a resistência mecânica, além da durabilidade do material (Carasek, 2010).

Conforme a ASTM C-270 (ASTM,2019), a retenção de água das argamassas não deve possuir um valor inferior a fração de 75%. Na Tabela 05 observa-se a classificação da argamassa por meio da retenção de água apresentada pela NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 05 – Classificação das argamassas por meio da retenção de água

Classe	Retenção de água (%)
U1	≤ 78
U2	72 a 85
U3	80 a 90
U4	86 a 94
U5	91 a 97
U6	95 a 100

Fonte – NBR 13281 (ABNT, 2005) adaptado pelo autor, 2021.

A retenção de água proporciona com que as reações químicas de endurecimento dos elementos aglomerantes ocorram de forma gradual, colaborando, desse modo, com a uma hidratação cimentícia adequada e como consequência, um aumento da resistência do material cimentício (Baía & Sabbatini, 2000).

3.3.3 Resistência mecânica

A resistência mecânica da argamassa trata da propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de solidificação interna que seja capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens, sendo elas ações simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (Carasek, 2010).

A resistência mecânica da argamassa pode variar conforme o tipo de solicitações ao qual está submetida. A argamassa deve possuir resistência para suportar as movimentações da base, que podem surgir por diversos motivos, como recalques, dilatação e contração do revestimento devido às variações de temperatura.

A resistência mecânica deve justamente combater essas solicitações que por fim podem provocar fissuras ou falhas na aderência (Tristão, 1995).

3.3.4 Estabilidade volumétrica

A falta de estabilidade volumétrica do material pode provocar defeitos no reboco apesar de que na maioria das vezes eles são provocados pela ação do intemperismo (secagem prematura pela ação do vento, congelamento e degelo, molhagem e secagem) (Dubaj, 2000).

3.4 Análise granulométrica

Seguindo os procedimentos expressos na NBR 7181 (ABNR, 2016) a análise granulométrica serve para determinar as dimensões das partículas de solo e estudar a quantificação das distribuições por tamanho de partículas individuais de minerais do solo.

A análise das dimensões das partículas é importante uma vez que é possível deduzir indicações valiosas, das quais podem ser citadas a proveniência das partículas, como as rochas que as deram origem, como também como se deu o transporte das partículas e também sobre os ambientes deposicionais (Dias, 2004).

Existem basicamente dois métodos para realizar a análise granulométrica, o processo da peneiração que é utilizado para distribuição granulométrica da areia e cascalho, uma vez que a peneira nº 200 (0,075 mm) coincide com a dimensão que separa a areia do silte (0,06 mm); e temos também o método da sedimentação que é utilizado para granulometria da argila e silte (Martins, 2020).

3.4.1 Peneiração

Esse processo condiz com a passagem das partículas de solos por uma série de peneiras de malha quadrada, cuja malha vai ficando cada vez com menos espaço. O processo pode ser realizado de forma tanto manual quanto mecânica, em ambos os casos as peneiras são sujeitas a movimentos de translação e rotação, alternando várias vezes o sentido (Martins, 2020).

As partículas que ficam retidas em cada peneira representam a fração do solo com dimensão superior à da malha presente na peneira e conseqüentemente inferior à da malha que a antecede. Após isso o material retido é pesado para desse modo determinar a que percentual essa fração de solo pertence em relação ao peso total da amostra.

3.5 Preparo da argamassa

A composição das argamassas, em sua maioria, é confeccionada de forma empírica, com base em traços de estudos já realizados, o que pode variar também dependendo da finalidade ao qual ela será utilizada, sendo ela estabelecida pelo projetista ou construtor. Seu preparo deve sempre obedecer às condições de projetos. Além disso a NBR 7200 (ABNT, 1998) padroniza o preparo da mistura devendo seguir os seguintes critérios:

- As argamassas devem ser misturadas de forma mecanizadas, ou em casos especiais, por processo manual, até a obtenção de uma massa perfeitamente homogênea;
- No processo mecanizado o tempo de mistura não deve ser inferior a 3 min nem superior a 5 min;
- No processo de mistura manual, devem ser preparados volumes de argamassa inferiores a 0,05 m³ por vez;

3.6 Índice de consistência

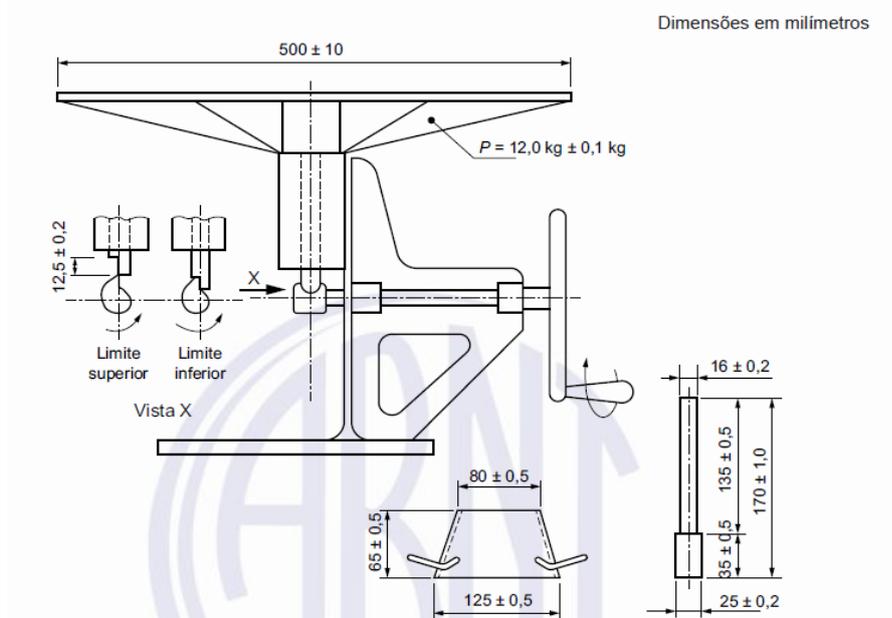
A consistência é a propriedade pela qual a argamassa tende a resistir a deformações. Segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016) o índice de consistência (IC) é a média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros e arredondada para o número inteiro mais próximo. Conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019) o índice de consistência para argamassa é considerado normal quando se apresenta no intervalo de 165 (± 5) mm.

O ensaio é realizado logo após o preparo da argamassa, o qual é inserida dentro de um molde troncônico centrado sobre a mesa para índice de consistência. São preenchidas 3 camadas sucessivas com alturas aproximadamente iguais e

aplicadas em cada uma delas, quinze, dez e cinco golpes com soquetes respectivamente, de modo a deixar o material uniformemente distribuído.

Depois é retirado o molde verticalmente e acionado a manivela da mesa para índice de consistência, de modo que a mesa suba e desça 30 vezes durante o intervalo de 30 segundos de maneira uniforme. Logo após a última queda da mesa, é feito a aferição com auxílio do paquímetro do espalhamento da argamassa e registrada a medida. A imagem 01 nos apresenta as dimensões do aparelho utilizado para determinar o IC, como também o molde troncônico e o soquete, ambos necessários para realização do ensaio.

Figura 01 – Aparelho usado na determinação de consistência da argamassa



Fonte – NBR 7215 (ABNT, 2019).

3.7 Ensaios de resistência da argamassa

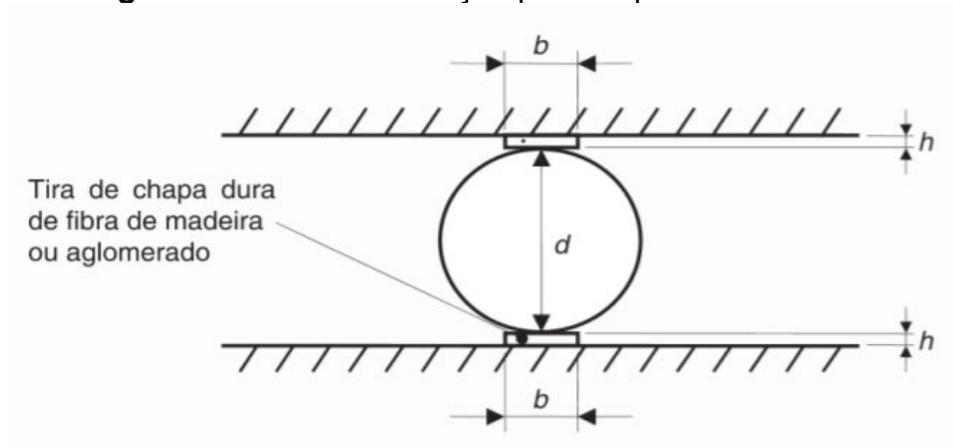
3.7.1 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio conhecido também como ensaio brasileiro de tração, é o mais utilizado para obter resultados de tração para concretos e argamassas, isso se deve ao baixo custo e por possuir grande semelhança ao ensaio de compressão axial.

Conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), com esse ensaio é possível obter resultado de resistência à tração de forma indireta, no qual consiste apenas em

posicionar o corpo de prova na posição horizontal apoiada por duas chapas de madeira sobre o prato da máquina de compressão. Deve-se aplicar uma carga, com escala de força pré-definida de tal modo que a ruptura do corpo de prova ocorra no intervalo em que a máquina foi calibrada, sendo aplicada de forma contínua e sem choques, com acréscimo constante da tensão de tração, com uma velocidade de 0,05 ($\pm 0,02$) Mpa/s até que ocorra a ruptura do corpo de prova. A imagem 02 apresenta o esquema de como é posicionado o corpo de prova para realização do ensaio de tração por compressão diametral.

Figura 02 – Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte – NBR 7222 (ABNT, 2011).

As tiras de madeiras utilizadas para auxiliar o posicionamento do corpo de prova, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), devem possuir base (b) de 0,15 ($\pm 0,01$) vezes o diâmetro (d) em milímetro e a altura deve ser 3,5 ($\pm 0,5$) mm, como observa-se na Imagem 03. Segundo Conterato (2011), essas tiras servem para impedir que haja pontos de elevadas tensões de compressão na extremidade do diâmetro vertical do corpo de provas, impedindo assim que surjam forças de puncionamento. A resistência à tração por compressão diametral é encontrada pela Equação 01:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d \ell} \quad (1)$$

Sendo:

- $f_{ct,sp}$ – Resistência a tração indireta (MPa);
- F – Força aplicada (N);

- d - é o diâmetro do corpo de prova (mm);
- ℓ - é o comprimento do corpo de prova (mm).

Figura 03 – Tiras de madeiras utilizadas no ensaio de tração por compressão diametral



Fonte – autor (2021).

3.7.2 Resistência à compressão

A análise de resistência à compressão é um dos principais requisitos para a produção de argamassas, no qual, através desse ensaio é analisada a capacidade do material de suportar cargas.

A NBR 7215 (ABNT, 2019), é a norma que especifica o método para determinar a resistência à compressão do cimento em corpos de provas cilíndrico. A resistência a compressão individual, em megapascals, de cada corpo de prova é obtido pela divisão da força de ruptura pela área nominal da seção do corpo de prova. A resistência à compressão média é obtida pela média das resistências individuais, em megapascals, dos quatro corpos de provas ensaiados na mesma idade.

A norma também determina que seja calculado o desvio relativo máximo (DRM) da série de quatro resultados, dividindo o valor absoluto da diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afaste dessa média, seja ela para mais ou para menos, pela resistência média, e posteriormente, multiplicando este quociente por 100.

Quando o DRM é superior a 6%, deve-se calcular uma nova média, descartando, dessa vez, o valor que mais se afasta da média. Caso o novo DRM calculado seja menor que 6%, a nova média calculada com estes três resultados deve constar no relatório do ensaio, caso contrário, o resultado deve ser desconsiderado e o ensaio deve ser refeito.

A norma NBR 7215 (ABNT, 2019) ainda determina algumas particularidades de repetitividade e reprodutividade. Na primeira ela expressa que a diferença entre dois resultados finais referentes à mesma idade, obtidos pelo mesmo operador a partir de uma mesma amostra submetida ao ensaio, e utilizando do mesmo equipamento em curto intervalo de tempo, não pode ser superior a 10% da média entre eles.

Na segunda particularidade a norma determina que a diferença entre dois resultados finais que se refira à mesma idade, obtido por dois operadores diferentes operando em laboratório diferentes a partir de uma mesma amostra, não pode ultrapassar 15% da média entre eles.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais utilizados

4.1.1 Cimento

O cimento CP V – ARI MAX foi utilizado em todo o trabalho. Sendo escolhido por apresentar um alto grau de pureza o que permite melhores desempenhos e altas resistências já nas primeiras horas de aplicação.

4.1.2 Aditivo

Foram utilizados dois tipos de aditivos durante os ensaios, o plastificante da marca Sika Concreto Forte e o superplastificante com nome de Superflow fornecido pela Suape Aditivos. Ambos os produtos foram escolhidos com o objetivo de reduzir a quantidade de água da mistura e proporcionar uma melhor trabalhabilidade do cimento, dessa forma aumentando as resistências mecânicas das argamassas.

4.1.3 Água

A água utilizada nos ensaios foi proveniente da rede de abastecimento da CAGEPA-PB.

4.1.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo foi obtido em depósito de materiais de construções na cidade de Araruna-PB, local onde fica situada a Universidade Estadual da Paraíba – Campus VIII. A areia proveniente desse depósito é extraída em fontes da região do Curimataú, que abrange a cidade de Araruna.

4.1.5 Materiais cimentícios suplementares

Foram utilizados dois tipos de Materiais Cimentícios Suplementares: o Metacaulim na coloração rosa, da marca BZ, fornecido pela empresa Sibelco, fabricado pela Caulim Nordeste situada em Ipojuca-PE. E a sílica ativa da marca Ferbasa que atende os requisitos da NBR 13956 (ABNT, 2012).

4.2 Métodos

4.2.1 Definição do traço

Como buscou-se atingir argamassas que possuam altas resistências nos primeiros dias de cura, e que possa, porventura, ser utilizada para reparo de estruturas, foram feitas pesquisas bibliográficas para obter referências de traços que pudessem ser realizados nesse estudo e que proporcionassem traços fortes e, conseqüentemente, altos valores de resistência. Logo, com base na justificativa do item 3.1 foi definido que o traço base usado nesse estudo seria 1:1 (cimento e areia).

Objetivando-se atingir uma argamassa forte, de forma efetiva, utilizando menores quantidades de materiais, a relação entre a água e o cimento escolhida para desenvolver os traços foi de $a/c = 0,30$, com base no que foi apresentado no item 3.2.3 desse material, podendo variar conforme a necessidade de obter uma argamassa trabalhável.

A porcentagem de aditivo é calculada em relação a massa do aglomerante hidráulico, e seu valor é expresso pelo fabricante, porém nesse trabalho a fração desse material foi variando de acordo com o valor do índice de consistência que foi sendo obtido em cada ensaio, ajustando conforme a necessidade para obter o valor próximo de 165 (± 5) mm, valor esse considerado normal pela NBR 7215 (ABNT, 2019).

A frações de sílica ativa e metacaulim utilizada nesse estudo foram escolhidas, conforme apresentada nos itens 3.2.5.1 e 3.2.5.2 respectivamente, em 5%, 7,5% e 10% para a sílica, sendo utilizado tanto em adição como em substituição em relação a massa do cimento e 5% e 10% para o metacaulim, utilizado em substituição em relação à massa do cimento.

4.2.2 Umidade do agregado miúdo

Foi determinada a umidade da areia utilizando o método da frigideira levada diretamente ao fogo, apesar de não ser um método normatizado é o método mais simples de se obter o valor de umidade do agregado miúdo. O procedimento consiste em coletar a amostra de agregado não saturado, dividir a amostra em duas partes, colocar uma de cada vez na frigideira e levar ao fogo, mexendo até eliminar toda a umidade. Após isso são pesadas as amostras e aplicada a Equação 02 a seguir:

$$U\% = 100 * \frac{M_u - M_s}{M_s} \quad (02)$$

Sendo:

- M_u – Massa úmido da amostra (g);
- M_s – Massa seca da amostra (g);
- $U\%$ - Teor de umidade da amostra (%).

4.2.3 Granulometria do agregado miúdo

A caracterização do agregado miúdo utilizado nos ensaios seguiu os critérios expressos na NBR NM 248 (ABNT, 2003) que prescreve o método para determinação da composição granulométrica de agregados miúdos.

Primeiramente foi determinado duas amostras de aproximadamente 1000 g cada do agregado e levado para estufa a uma temperatura de 105° C por cerca de 24 horas. Após as 24 horas foi realizado o quarteamento para garantir uma amostra representativa, e em seguida o peneiramento, sendo peneirada aproximadamente 500 g por vez através da sequência de peneiras de série normal, sendo agitada de forma manual conforme orientado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

4.2.4 Preparo da argamassa

Todo o ensaio da argamassa referente a esse estudo foi elaborado no Laboratório da Universidade Estadual da Paraíba – Campus VIII, localizado na cidade de Araruna-PB, e foi dividido em duas etapas de ensaios.

A primeira etapa consistiu no preparo de corpos de provas com variações na granulometria do agregado miúdo e aditivos com o intuito de obter a faixa granulométrica assim como o aditivo e sua fração que proporcionassem maior resistência mecânica a argamassa, sendo realizado o ensaio de compressão após 7 dias de cura.

Nessa primeira etapa, a mistura da argamassa de controle ocorreu de forma manual, já os traços contendo as variações de agregado e as variações de aditivos o processo de mistura ocorreu de forma mecanizada com um misturador de argamassa acoplado a uma furadeira para obter um maior controle na velocidade de mistura.

Foram confeccionados 2 copos de provas para cada traço dessa primeira etapa de ensaios.

Para o traço de controle, o preparo da argamassa foi feito adicionando cada componente separadamente e misturado por 30 segundo antes de adicionar o componente seguinte.

- 1° Passo: Foi adicionado agregado miúdo e misturado por 30 segundos;
- 2° Passo Foi colocado o cimento Portland na mistura e misturado novamente por 30 segundos;
- 3° Passo: Foi adicionado $\frac{1}{2}$ da porção de água e misturado todo o material. Foi necessário a remoção do excesso de argamassa nas paredes do recipiente misturador com uma espátula;
- 4° Passo: Misturado novamente os componentes com $\frac{1}{2}$ da água restante. Quando o traço controle continha aditivo, esse foi dissolvido nessa última parte de água;
- 5° Passo: Na última etapa verifica-se a necessidade de remoção da argamassa presente na parede do misturador, caso contrários a mistura de argamassa está pronta para moldar os CPs.

Para os traços utilizando o misturador de argamassa adaptado com a furadeira foi procedido os mesmos passos descritos anteriormente para o processo de mistura manual.

Na segunda etapa de ensaios, após definidos a granulometria e o aditivo como a fração dele que contribui para melhor resistência da argamassa, foi utilizado como variável as frações de sílica ativa nos valores de 5%, 7,5 % e 10% tanto em adição como em substituição em relação a massa do cimento para confecção de 3 CPs para

cada traço. Os traços com essa composição foram elaborados a partir dos seguintes passos:

- 1° passo – 2° Passo: Foram realizadas conforme o procedimento da primeira rodada de ensaios;
- 3° Passo: Foi adicionado 85% do volume de água e os outros 15% foram misturados ao aditivo;
- 4° Passo: Conforme necessários, era removido o excesso de argamassa presa nas paredes do recipiente de forma manual e em seguida, acrescentado a sílica ativa ao misturador e misturado todos os componentes por 30 segundos;
- 5° Passo: O restante da água com aditivo dissolvidos foi adicionado. Finalizando a argamassa com mais 30 segundos de mistura.

Para as argamassas constituídas de sílica ativa e metacaulim os procedimentos para o preparo foram os seguintes:

- 1° Passo: Inicialmente foram misturados manualmente todos os materiais secos (cimento + agregado miúdo + sílica ativa + metacaulim) em um recipiente plástico, e colocados no recipiente de alumínio para mistura mecanizada por 30 segundos, isso se deve ao fato da argamassa ter ficado muito pesada nos procedimentos anteriores o que dificultava manter um controle de rotação do misturador de argamassa;
- 2° Passo: Foi dissolvido 15% do volume de água com o aditivo, e o 85% foram acrescentados de forma gradual em três partes, onde cada acréscimo era seguido por 30 segundo de mistura da massa e ao finalizar o tempo era removido o excesso de argamassa com auxílio de uma trolha (colher de pedreiro) que ficava na parede do recipiente e misturado ao restante da argamassa de forma manual.
- 3° Passo: Após o acréscimo dos 85% de água, eram acrescentados os 15% que estavam misturados com o aditivo, também em três partes, procedendo do mesmo modo da etapa anterior: 30 segundos de mistura da massa e após cada mistura era removido o material que ficava acumulado na parede do recipiente e misturado de forma manual.
- 4° Passo: Removia o excesso de material que ficava na parede do recipiente e verificava se a massa estava totalmente homogênea, caso existisse algum

material seco, o conjunto era misturado por mais 30 segundos, caso contrário ela estava apta para ser moldada nos CPs.

4.2.5 Dosagem

Na primeira etapa de ensaios foram confeccionados três traços de controle, cada qual com 2 corpos de provas, uma para argamassa composta por cimento, areia em seu estado natural e água, outro com os mesmos materiais citados, porém com adição apenas de plastificante e um terceiro com os mesmos traços, mas ao invés de plastificante foi adicionado superplastificante ao conjunto. As dosagens do traço de controle estão apresentadas na Tabela 06.

Tabela 06 – Traços de referência da argamassa inicial

Traço	Cimento (g)	Areia (g)	a/c (g/g)	Água (g)	Tipo aditivo	Aditivo (% m.c.)	Aditivo (g)
TC-Φ	590	590	0,36	214	-		-
TC-P	590	590	0,29	171	P	2,12%	12,52
TC-SP	590	590	0,29	171	SP	1,00%	5,9

Fonte – Autor (2021).

Notas:

a/c – Relação água / cimento

%m.c. – porcentagem em relação a massa do cimento;

TC – Traço controle;

Φ – Traço sem aditivos;

P – Aditivo plastificante;

SP – Aditivo superplastificante.

Algumas observações podemos destacar nas dosagens do grupo de controle: a mistura do traço TC - Φ possuía relação a/c inicial de 0,30, porém ficou muito pesada durante o preparo e com isso foi acrescentado mais 0,45 g de água para melhorar a trabalhabilidade resultando em um novo fator de 0,36. Já nos traços TC-P e TC-SP o fator água cimento foi corrigido para 0,29 porque a umidade da areia encontrava-se em 3,56% e o IC do primeiro traço teve como resultado o valor de 165 mm já no limite considerado normal pela norma NBR 7215 (ABNT, 2019). A quantidade de aditivo plastificante utilizada foi proporcional a recomendação do fabricante descrita na

embalagem do produto (1 L para cada 5 Kg de cimento) acrescido de 6% e a quantidade de superplastificante foi de 1% em relação a massa do cimento. Lembrando que nos próximos traços também não foi seguindo as recomendações do fabricante.

Logo em seguida foram realizados o traço da argamassa de 1:1 (cimento : agregado miúdo) para comparação com o traço de controle, com variação de aditivos plastificantes (P) e superplastificantes (SP), com valores representados em porcentagens em relação à massa de cimento, e com diferente granulometria da areia, sendo classificada em areia normal (AN), areia média (AM), areia média fina (AMF), areia fina (AF) e areia fina passante na peneira 0,6 µm sem as partículas pulverulentas retidas no fundo da peneira (AF₂) (nomenclatura para classificação do agregado miúdo adotada pelo autor). Para cada mistura também foram confeccionados 2 corpos de prova. Os traços utilizados estão representados em massa (g) na Tabela 07.

Tabela 07 – Traços para comparação da argamassa inicial.

Traço	Cimento (g)	Distribuição da areia	Areia (g)	a/c (g/g)	Água (g)	Tipo aditivo	Aditivo (% m.c.)	Aditivo (g)
P-AN	630	AN	630	0,3	189	P	2,35%	14,83
SP-AN	630	AN	630	0,3	189	SP	0,20%	1,26
P-AM	630	AM	630	0,3	189	P	2,35%	14,83
SP-AM	610	AM	610	0,3	183	SP	0,20%	1,22
P-AMF	610	AMF	610	0,3	183	P	3,53%	21,56
SP-AMF	610	AMF	610	0,3	183	SP	0,40%	2,44
P-AF	610	AF	610	0,3	183	P	5,00%	30,5
SP-AF	610	AF	610	0,3	183	SP	0,75%	4,58
SP-AF ₂	610	AF ₂	610	0,3	183	SP	0,80%	4,88

Fonte – Autor (2021).

Notas:

Areia natural (AN) – material passante na peneira 2,4 mm;

Areia média (AM) – material passante na peneira de 1,2 mm;

Areia média fina (AMF) – material passante na peneira 0,6 mm;

Areia fina (AF) – material passante na peneira 0,3 mm)

Areia fina 2 (AF₂) – material passante na peneira 0,6 mm sem material pulverulento do fundo.

Destaca-se que a dosagem de cimento e agregado miúdo foi ajustada ao longo da confecção dos traços de argamassa, até chegar em uma quantidade suficiente para confeccionar a quantidade de corpo de prova desejado sem que falte material ou sobre em excesso.

Após análise dos resultados de resistência a compressão foi escolhida a granulometria da areia e o aditivo além de sua fração que proporcionaram uma maior resistência à argamassa, sendo eles a areia do tipo AF2 (passante na peneira de número 600 sem a presença de partículas pulverulenta) e o superplastificante superflow com 0,8% em relação a massa do cimento, conforme podemos observar no Item 5.1.

Na segunda etapa de ensaio, foram confeccionados novamente 2 traços de argamassa para controle cada um com 3 CPs. E traços de comparação possuindo apenas SA em sua composição sendo submetidos aos ensaios de compressão, e os traços contendo SA e MC sendo submetidos ao ensaio de compressão e de tração por compressão diametral, com cada traço produzindo também 3 CPs. Os traços da argamassa de controle estão representados na Tabela 08 a seguir:

Tabela 08 – Traços para argamassa controle da segunda etapa de ensaios.

Traço	Cimento (g)	Distribuição da areia	Areia (g)	a/c (g/g)	Água (g)	Tipo aditivo	Aditivo 0,8% (g)
TC-1	689	AF ₂	689	0,30	207	SP	5,51
TC-2	689	AF ₂	689	0,30	207	SP	5,51

Fonte – Autor (2021).

Notas:

TC – Traço Controle

Podemos observar na tabela que o consumo de materiais foi ajustado para produzir 3,5 corpos de prova, evitando assim que a perda de material ao longo do ensaio não prejudicasse a quantidade de corpos de provas necessárias moldar para o estudo.

Na Tabela 09 abaixo temos o traço utilizado para as argamassas de comparação com a presença de sílica ativa em sua composição, utilizado tanto em

adição como em substituição nas frações de 5%, 7,5% e 10% em relação a massa do cimento.

Tabela 09 – Traços para comparação da argamassa inicial da segunda etapa de ensaios com adição e substituição de sílica ativa com 5%, 7,5% e 10%.

Traço	Cimento (g)	Distribuição da areia	Areia (g)	a/(c+MCS) (g/g)	Água (g)	SA (g)	Tipo aditivo	Aditivo 0,8% (g)
IS-A5	680	AF ₂	680	0,35	249,9	34,00	SP	5,44
TS-A7,5	680	AF ₂	680	0,35	255,9	51,00	SP	5,44
TS-A10	689	AF ₂	689	0,35	265,3	68,90	SP	5,51
TS-S5	654,6	AF ₂	689	0,35	241,2	34,45	SP	5,24
TS-S7,5	637,33	AF ₂	689	0,35	241,2	51,68	SP	5,10
TS-S10	620,1	AF ₂	689	0,35	241,2	68,90	SP	4,96

Fonte – Autor (2021).

Notas:

SA – Sílica Ativa, calculado em relação a massa do cimento (689 g) nas frações de 5%, 7,5% e 10% usado em tanto em adição a massa quanto em substituição.

SP – Aditivo superplastificante com 0,8% em relação a massa de cimento real utilizada no traço.

(c+MCS) – o fator a/c foi levado em consideração a massa total do cimento mais o material cimentício suplementar utilizado na mistura.

TS-A – Traço de Sílica ativa em Adição.

TS-S – Traço de Sílica ativa em Substituição.

Destacam-se algumas observações quanto ao consumo de materiais para o preparo dos traços de argamassa da Tabela 09. A relação água/cimento foi aumentada para 0,35 devido ao acréscimo do MCS à argamassa deixando-a mais coesa o que provocou uma dificuldade na trabalhabilidade da mistura. Vale salientar também que para obtenção do consumo de água, foi levado em consideração a massa do cimento mais a massa do MCS utilizada em ambas as formas de preparo (adição e substituição).

Os próximos traços foram preparados combinando as diversas frações de materiais cimentícios suplementar. Para cada combinações foram confeccionados dois traços, um para ser submetido à compressão e outro para tração por compressão

diametral, produzindo assim 6 CPs por traço. Os vários traços e as respectivas combinações de dosagens dos CMS estão representados na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 – Traços da argamassa para comparação na segunda etapa de ensaios com adição de sílica ativa e substituição de metacaulim

Traço	Cimento (g)	Tipo da areia	Areia (g)	a/c (g/g)	Água (g)	MC (% m.c.)	MC (g)	SA (% m.c.)	SA (g)	Tipo aditivo	Aditivo (g)
T5S5M	654,55	AF ₂	689	0,35	253,21	5%	34,45	5%	34,45	SP	5,24
T5S10M	620,10	AF ₂	689	0,35	253,21	10%	68,90	5%	34,45	SP	4,96
T7,5S5M	654,55	AF ₂	689	0,35	259,24	5%	34,45	7,5%	51,68	SP	5,24
T7,5S10M	620,10	AF ₂	689	0,35	259,24	10%	68,90	7,5%	51,68	SP	4,96
T10S5M	654,6	AF ₂	689	0,35	265,30	5%	34,56	10%	68,90	SP	5,24

Fonte – Autor (2021).

Notas:

T5S5M – Traço com 5% de adição de sílica ativa e 5% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

T5S10M - Traço com 5% de adição de sílica ativa e 10% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

T7,5S5M – Traço com 7,5% de adição de sílica ativa e 5% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

T7,5S10M – Traço com 7,5% de adição de sílica ativa e 10% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

T10S5M – Traço com 10 % de adição de sílica ativa e 5% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

4.2.6 Índice de consistência

O índice de consistência da argamassa foi realizado no laboratório da Universidade Estadual da Paraíba – Campus VIII e seguiu os procedimentos expressos no anexo A da NBR 7215 (ABNT, 2019).

A mesa utilizada para o ensaio foi a mesma utilizada para determinação de consistência do concreto (mesa de Graff), única disponível na universidade para o ensaio. Foram utilizados também o molde rígido troncônico e o soquete, ambos de metal. Todos os equipamentos foram pincelados com desmoldantes antes da realização de cada ensaio.

Após preparada a argamassa conforme explicado no item 4.2.4, o material foi levado para realização do índice de consistência, o qual um operador posicionou o

molde troncônico no centro da mesa de índice de consistência, enquanto o outro operador com o auxílio da espátula colocou a argamassa em três camadas com mesma altura, e com o soquete foi aplicado 15, 10 e 5 golpes uniforme e homogeneamente distribuídos respectivamente na primeira, segunda e terceira camadas. Após isso foi realizado a remoção do material que ultrapassava a borda e alisado o topo, além de limpado o excesso de argamassa da mesa ao redor do molde.

Em seguida, removeu-se o molde troncônico e a mesa foi movimentada verticalmente para que caísse 30 vezes durante o intervalo de tempo de 30 segundos a uma altura de 3 cm. Após o procedimento, aferiu-se o diâmetro da argamassa em duas direções com o auxílio de uma trena como na Figura 04, e com a média foi determinado o índice de consistência de cada traço.

Figura 04 – Aferição do espalhamento da argamassa durante ensaio de IC



Fonte – Autor (2021).

4.2.7 Cuidados com o corpo de prova

Com a argamassa preparada, ela foi submetida ao ensaio de consistência e imediatamente em seguida foi utilizada para moldar os corpos de prova seguindo os critérios presentes na NBR 7215 (ABNT, 2019). Os moldes dos corpos de provas cilíndricos possuíam dimensão de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, os quais forma preenchidos com argamassa com auxílio da espátula, em quatro camadas de

alturas aproximadamente idênticas, com cada camada recebendo 30 golpes com soquete normal de modo uniforme e homogeneamente distribuídos.

Após o adensamento da última camada dos CPs, foi deixado um leve excesso de argamassa acima da borda superior e o molde foi reservado em um local protegidos contra eventual gotejamento ou partículas que possa cair sobre eles, sendo abrigados durante 24 horas. Decorrido até 6 horas do momento da moldagem, foi feito o rasamento dos corpos de prova com auxílio de uma régua metálica deixando a superfície nivelada.

Terminando o período inicial de cura, os corpos de prova foram retirados dos moldes com cuidado para não danificar sua superfície, foram identificados e imersos, separados entre si na bacia com água não corrente para cura, permanecidos durante 7 dias que foi a idade especificada para rompimento dos CPs.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Umidade do agregado miúdo

A umidade do agregado foi definida utilizando o método da frigideira, sendo coletada uma amostra do agregado miúdo destinado a realização desse estudo, no valor de 955 gramas, e foi dividida em duas partes e colocado cada uma por vez na frigideira para eliminar toda umidade. Após o procedimento juntou-se as duas amostras, e pesou novamente, obtendo assim a valor da massa do agregado miúdo em seu estado seco de 921 g. Utilizando a Equação 02, chegamos ao teor de umidade no valor de 3,56% como podemos observar na tabela 15.

Tabela 11 – Teor de umidade do agregado miúdo

Massa da amostra úmida (g)	Massa da amostra seca (g)	Teor de umidade U%
955	921	3,56%

Fonte – Autor (2021).

5.2 Granulometria do agregado miúdo

Depois de realizado todo o processo de peneiramento, o material retido em cada peneira foi separado e pesado. Os valores das amostras são apresentados na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12 – Distribuição granulométrica do agregado
Composição Granulométrica – NBR NM 248

Peneiras mm	1º Determinação		2º Determinado		% Retida Média	% Retida Acumulada
	Peso Retido (g)	% Retido	Peso Retido (g)	% Retido		
4,75	10,19	1,0	15,9	1,6	1,3	1,3
2,36	34,16	3,4	37,07	3,7	3,6	4,9
1,18	114,24	11,5	124,63	12,5	12,0	16,9
0,6	198,08	19,9	204,44	20,5	20,2	37,0
0,3	278,93	28,0	307,72	30,8	29,4	66,4
0,15	229,76	23,1	215,28	21,6	22,3	88,8
fundo	130,56	13,1	93,51	9,4	11,2	100,0
Total	995,92	100,0	998,55	100,0	100,0	

Fonte – Autor (2021).

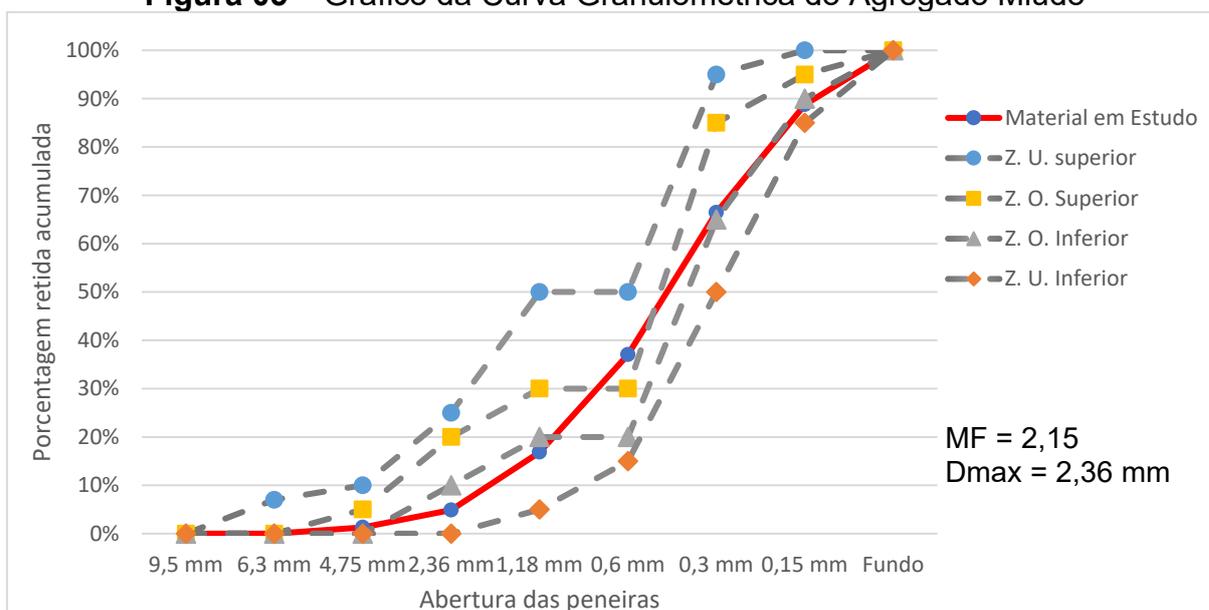
Determinado a massa total do material retido em cada uma das peneiras mais o fundo do conjunto, foi verificado se existe diferença maior que 0,3% em relação a massa seca da amostra aferida inicialmente. E como podemos observar na Tabela 13 a seguir, o somatório de todas as massas diferiu apenas 0,3% com relação a massa inicial, justamente o limite determinado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 13 – Diferença de massa antes e depois do peneiramento
Composição Granulométrica – NBR NM 248

Determinação	Total amostra	Total amostra	Total	Total	Diferença %	Média %
	1 (g)	2 (g)	(g)	retido (g)		
1	500,27	500,05	1000,32	995,92	96,56%	99,70%
2	500,05	500,14	1000,19	998,55	99,84%	

Fonte – Autor (2021).

Constatou-se a partir da Tabela 12 que a dimensão máxima característica do agregado é de 2,36 mm e o módulo de finura é no valor de 2,15. Além disso, observando o Figura 05 que corresponde a distribuição granulométrica do agregado miúdo comparado com as zonas limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005), temos que o agregado em questão é classificado no módulo de finura da Zona Utilizável Inferior, logo uma areia média fina.

Figura 05 – Gráfico da Curva Granulométrica do Agregado Miúdo

Fonte – Autor (2021).

5.3 Índice de consistência

Esse ensaio teve como objetivo analisar a trabalhabilidade da argamassa preparada para as diversas dosagem estabelecidas nesse estudo, uma vez que a trabalhabilidade é uma propriedade importante para determinar que tipo de aplicação a argamassa está apta a ser utilizada, sem falar na determinação de sua resistência mecânica, buscando aquela que apresente uma consistência considerada ideal pela norma NBR 7215 (ABNT, 2019), no valor de 165 ± 5 mm.

A seguir tem-se os valores de índice de consistência das argamassas confeccionadas durante a primeira etapa de ensaios para esse estudo (Tabelas 14 e 15), além da Figura 06 que nos permite observar com mais clareza os resultados obtidos para esse ensaio.

Tabela 14 – Análise da consistência da argamassa da primeira rodada de ensaios do grupo de controle

Traço	Slump (mm)		Média
	x	y	
TC- Φ	165	165	165
TC-P	160	155	157,5
TC-SP	260	260	260

Fonte – Autor (2021).

Notas:

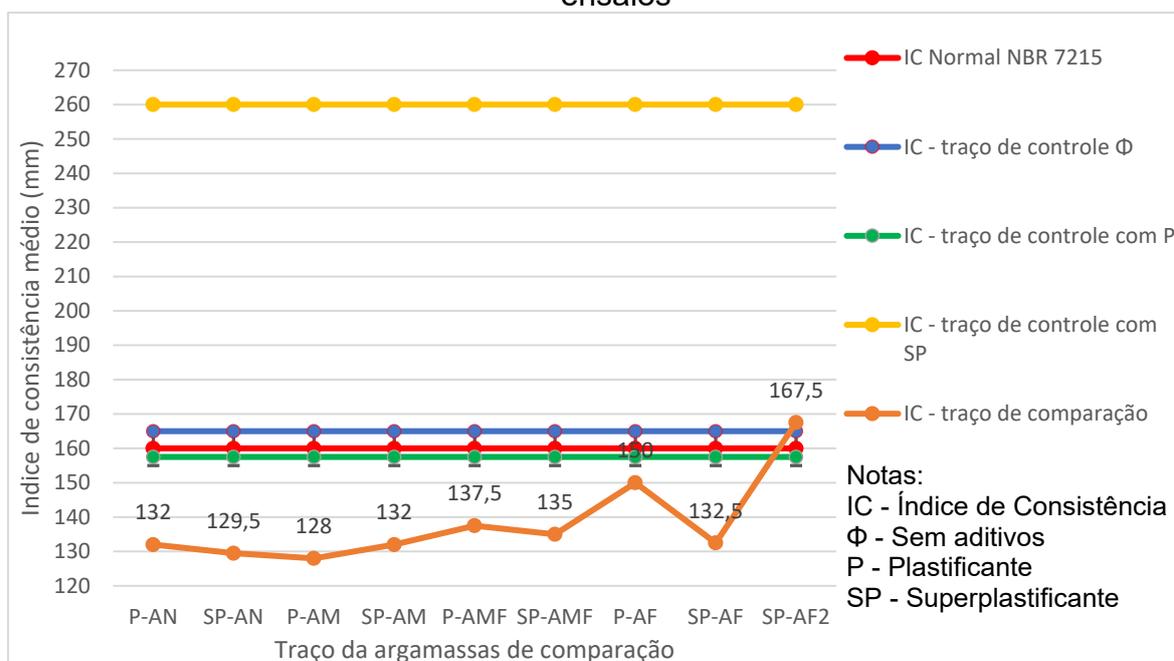
TC – Traço Controle

Tabela 15 – Análise da consistência da argamassa da primeira rodada de ensaios para comparação

Traço	Slump (mm)		Média
	x	y	
P-AN	133	131	132
SP-AN	130	129	129,5
P-AM	129	127	128
SP-AM	135	129	132
P-AMF	135	140	137,5
SP-AMF	130	140	135
P-AF	145	155	150
SP-AF	135	130	132,5
SP-AF2	165	170	167,5

Fonte – Autor (2021).

Figura 06 – Gráfico do índice de consistência das argamassas da primeira etapa de ensaios



Fonte – Autor (2021).

Observa-se após análise das Tabelas 14 e 15, juntamente com Figura 06, que o traço de controle com a areia em seu estado natural e sem adição de aditivos TC- Φ e o com plastificante TC-P obtiveram seus índices de consistências dentro dos limites que a NBR 7215 (ABNT, 2019) específica como normal.

Além disso, analisando o grupo de argamassas de comparação com variação de granulometria do agregado e aditivos, percebe-se que para essa análise, levando em consideração o índice de consistência, o traço SP-AF2 foi o que mais se aproximou do grupo controle e da faixa considerada normal pela norma. Sendo esse um dos

fatores que justifica a escolha dessa composição a ser utilizada nos ensaios da segunda etapa. Podemos observar ainda que os traços que apresentaram agregado miúdo com maiores granulometria tiveram sua trabalhabilidade reduzida, o que mais se aproximou foi o traço P-AF, o que melhorou ainda o resultado quando decidiu retirar da mistura o material pulverulento (passante na peneira de abertura 150 μm).

Abaixo apresentam-se as Tabelas 16 e 17 além da Figura 07 que correspondem aos índices de consistências das argamassas da segunda etapa de ensaios com um novo grupo controle e traços com sílica ativa em adição e substituição em relação a massa do cimento nas frações de 5%, 7,5% e 10%, além de já definidos a granulometria do agregado miúdo e do aditivo mais sua fração que obtiveram melhor desempenho nos ensaios anteriores. Na Figura 08 temos o ensaio de IC para cada traço desse grupo.

Tabela 16 – Análise da consistência da argamassa da segunda rodada de ensaios do grupo de controle

Traço	Slump (mm)			Média global	Desvio Padrão
	x	y	Média		
TC-1	165	167	166	167,25	2,86
TC-2	165	172	168,5		

Fonte – Autor (2021).

Notas:

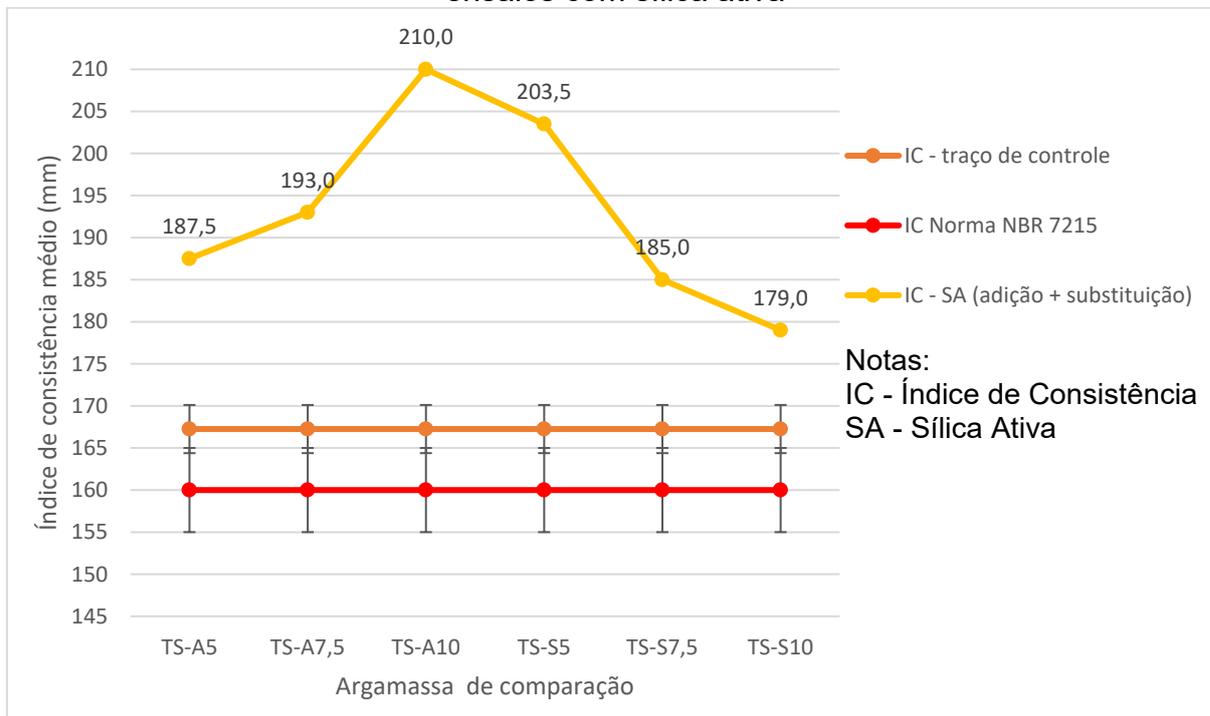
TC – Traço Controle

Tabela 17 – Análise da consistência da argamassa da primeira rodada de ensaios para comparação

Traço	Slump (mm)		
	x	y	Média
TS-A5	190	185	187,5
TS-A7,5	190	196	193
TS-A10	210	210	210
TS-S5	202	205	203,5
TS-S7,5	182	188	185
TS-S10	183	175	179

Fonte – Autor (2021).

Figura 07 – Gráfico do índice de consistência das argamassas da segunda etapa de ensaios com sílica ativa



Fonte – Autor (2021).

Analisando as Tabelas 16 e 17 e o gráfico da Figura 07, destaca-se que tanto a argamassa de controle quanto a argamassa de comparação tiveram seus valores de índice de consistência acima do limite que a norma NBR 7215 (ABNT, 2019) especifica como normal.

De todos o traço, o TS-S10 que possui 10% de sílica ativa em substituição em relação à massa do cimento, foi o único que mais se aproximou do valor normal de IC. Apresentando-se durante os ensaios como uma argamassa menos fluida em comparação com a TS-S7,5 (Figura 08g), mas mantendo ainda uma boa trabalhabilidade, conforme podemos observar na Figura 08h.

Ainda se ressalta que os traços com sílica ativa usados em substituição em relação a massa do cimento, menos na fração de 5%, foram os que obtiveram um índice de consistência com valores menores se comparados com a argamassa com adição de sílica. O traço TS-S5 apresentou uma difícil trabalhabilidade por estar mais fluida em comparação a TS-A5 como se observa na Figura 08c e 08f.

Figura 08 – Ensaio de índice de consistência da argamassa com sílica ativa



(a) Argamassa TC-1.



(b) Argamassa TC-2.



(c) Argamassa TS-A5.



(d) Argamassa TS-A7,5.



(e) Argamassa TS-A10.



(f) Argamassa TS-S5.



(g) Argamassa TS-S7,5.



(h) Argamassa TS-S10.

Fonte – Autor (2021).

Algo importante deve ser destacado: nos traços TS-A5, TS-A7,5, TS-S5 e TS-S7,5 os corpos de prova tiveram um comportamento inesperado; como observado na Figura 09, ocorreu expansão da argamassa após algumas horas depois de colocadas nos moldes. A princípio desconfiou-se de uma possível reação com o desmoldante, mas o aspecto visual mostrava que os grãos, na sílica ativa, estavam apresentando-se de forma agregadas e com tamanhos variados, diferentemente da característica natural do produto, indicando que houve absorção de umidade por parte do material. Diante disso os traços que apresentaram esse comportamento foram refeitos e a sílica passou a ser peneirada na peneira de abertura 0,30 mm, para que dessa forma as partículas do material estivessem uniformes ao ser adicionado à mistura, como observa-se na Figura 10. Como a quantidade de cimento CP V – ARI MAX estava limitada e a pandemia dificultava a obtenção de mais produtos, a quantidade de material foi reduzido proporcionalmente até o limite suficiente para produzir os 3

corpos de prova, atendendo assim a quantidade de material disponível para ensaio. Após esses cuidados não foi mais observada expansão da argamassa durante a confecção dos CPs.

Figura 09 – Expansão da argamassa contendo sílica ativa



Fonte – Autor (2021).

Figura 10 – Sílica ativa peneirada na peneira de abertura 0,3 mm



Fonte – Autor (2021).

Em seguidas é mostrada a Tabela 18 referente aos índices de consistência da argamassa de comparação com sílica ativa em adição e metacaulim em substituição, ambas em relação a massa do cimento. Na Figura 11 temos o gráfico com os resultados dos ensaios, e na Figura 12 a consistência de cada traço durante o ensaio de IC.

A partir da análise da Tabela 18 em conjunto com análise gráfica da Figura 11, percebe-se que o Traço T7,5S5M (argamassa com composição de adição de 7,5% de sílica ativa e substituição de 5% de metacaulim) mais se aproximou do traço do grupo de controle, porém ainda se apresenta fora da faixa para índice de consistência

considerado normal segundo a NBR 7215 (ABNT, 2019), o que não significa que seja ruim, irá depender da finalidade a qual será destinada, porém para esse estudo foi definido o valor de IC da NBR como parâmetro e avaliação.

Já os traços de comparação T7,5S10M (argamassa com adição de 7,5% de sílica ativa e substituição de 10% de metacaulim) e T10S5M (argamassa com adição de 10% de sílica ativa e substituição de 5% de meta caulim), foram os que mais se aproximaram da faixa de IC considerada normal pela norma, sendo o T7,5S10M o mais próximo e com uma boa trabalhabilidade como podemos observar nas Figura 12g, 12h, 12i e 12j.

Tabela 18 – Traços da argamassa para comparação com índice de consistência da segunda etapa de ensaios com adição de sílica ativa e substituição de metacaulim

Traço	Slump (mm)		Média	Média global	Desvio Padrão
	x	y			
T5S5M-1	183	183	183	181,75	1,64
T5S5M-2	179	182	180,5		
T5S10M-1	150	150	150	149,5	1,85
T5S10M-2	149	145,5	149		
T7,5S5M-1	164,5	165	164,75	169,38	5,82
T7,5S5M-2	179	169	174		
T7,5S10M-1	165	170	167,5	159,75	8,07
T7,5S10M-2	154	150	152		
T10S5M-1	161	164	162,5	162,25	1,09
T10S5M-2	162	162	162		

Fonte – Autor (2021).

Notas:

T5S5M – Traço com 5% de adição de sílica ativa e 5% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

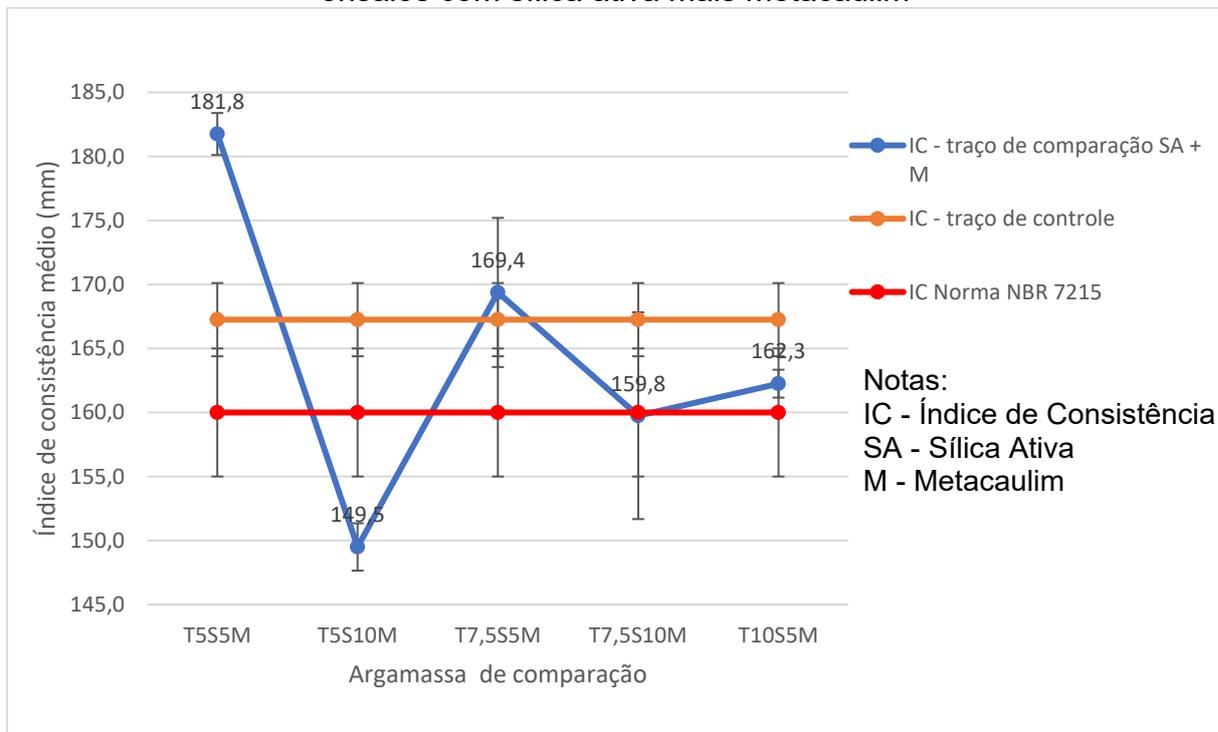
T5S10M - Traço com 5% de adição de sílica ativa e 10% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

T7,5S5M – Traço com 7,5% de adição de sílica ativa e 5% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

T7,5S10M – Traço com 7,5% de adição de sílica ativa e 10% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

T10S5M – Traço com 10 % de adição de sílica ativa e 5% de substituição de metacaulim, ambos em relação a massa do cimento;

Figura 11 – Gráfico do índice de consistência das argamassas da segunda etapa de ensaios com sílica ativa mais metacaulim



Fonte – Autor (2021).

Figura 12 – Ensaio de índice de consistência da argamassa com sílica ativa e metacaulim



(a) Argamassa T5S5M-1.



(b) Argamassa T5S5M-2.



(c) Argamassa T5S10M-1.



(d) Argamassa T5S10M-2.



(e) Argamassa T7,5S5M-1.



(f) Argamassa T7,5S5M-2.



(g) Argamassa T7,5S10M-1.



(h) Argamassa T7,5S10M-2



(i) Argamassa T10S5M-1



(j) Argamassa T10S5M-2

Fonte – Autor (2021).

5.4 Resistência mecânica

5.4.1 Resistência à compressão

Durante a primeira etapa de ensaios foram dosados traços de controle e traços de comparação com variação da granulometria do agregado miúdo e variação da dosagem de plastificante e superplastificante, os corpos de prova foram submetidos a ensaio de compressão após 7 dias de curas imersos em água não corrente.

Para cada traço foi confeccionado 2 CPs e nesse ensaio não foi calculado o DRM nem a repetitividade, devido à baixa quantidade de amostras por traço e também por ter como objetivo encontrar a melhor granulometria e aditivo a ser usados na segunda etapa de ensaios com utilização de MCS, diminuindo assim, o número de variáveis na próxima rodada.

Com os valores de resistência obtidos para essa primeira etapa de ensaios presentes nas Tabelas 19 e 20, junto com o gráfico da Figura 13 observa-se que os melhores resultados foram obtidos para os traços com adição de superplastificante, tanto para o traço de controle com SP como para o traço de comparação com SP, menos para aquele com utilização de areia do tipo AN (areia natural passante na peneira de 2,4 mm).

Comparando o gráfico da Figura 13 com o gráfico da Figura 06 do índice de consistência para argamassa da primeira etapa de ensaios, destaca-se que, apesar do alto valor de IC para o traço controle com superplastificante, a sua resistência foi considerada boa se comparado com os demais traços ensaiados.

Comparando ainda os gráficos observa-se que o traço que obteve maior desempenho foi o SP-AF2, apesar de não ter sido o que obteve maior valor de resistência à compressão com uso SP, foi o traço que obteve uma melhor trabalhabilidade, chegando ao valor próximo ao valor considerado normal pela NBR 7215 (ABNT, 2019) no ensaio de IC e um valor de resistência à compressão próximo do traço de controle.

Por mais que o SP-AF tenha obtido o maior resultado de resistência à compressão, ele, no ensaio de índice de consistência, teve um valor baixo, tendo sua trabalhabilidade inferior ao que a norma estabelece como normal, dificultando assim sua aplicação. Logo corrobora com a utilização do agregado miúdo AF2 - Areia média (Passante na 0,6mm s/ material pulverulento do fundo) - e o Aditivo Superplastificante com fração de 0,8% como componentes ideais para serem utilizados na segunda etapa de ensaios.

Tabela 19 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da primeira etapa de ensaios

Traço	CP1(Mpa)	CP2(Mpa)	Média (Mpa)
TC-Φ	39,1	35,18	37,14
TC-P	40,32	31,80	36,06
TC-SP	62,03	57,68	59,86

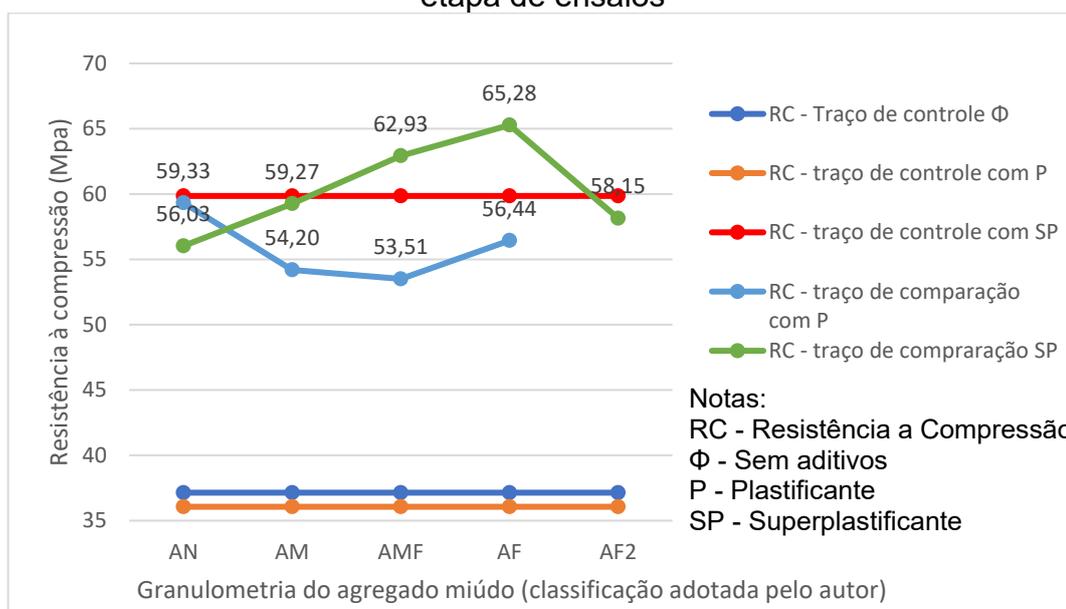
Fonte – Autor (2021).

Tabela 20 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de comparação da primeira etapa de ensaios com variação da granulometria e do aditivo

Traço	CP1(Mpa)	CP2(Mpa)	Média (Mpa)
P-NA	62,57	56,08	59,33
SP-NA	46,68	65,38	56,03
P-AM	47,78	60,61	54,20
SP-AM	55,55	62,98	59,27
P-AMF	56,34	50,67	53,51
SP-AMF	65,9	59,96	62,93
P-AF	60,28	52,60	56,44
SP-AF	64,62	65,94	65,28
SP-AF2	57,91	58,38	58,15

Fonte – Autor (2021).

Figura 13 – Gráfico de Resistência à compressão das argamassas da primeira etapa de ensaios



Fonte – Autor (2021).

A seguir tem-se os valores de resistência à compressão das argamassas referentes a segunda etapa de ensaios do traço controle na Tabela 21; do traço com sílica ativa com variação na porcentagem em adição e substituição, ambas nas frações de 5%, 7,5% e 10%, na Tabela 22, sendo confeccionados 3 corpos de prova para cada traço.

Tabela 21 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS							
Traço	CP1(Mpa)	CP2(Mpa)	CP3(Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão	DRM	Repetitividade
TC-1	49,77	56,96	58,95	55,23	3,94	9,88%	3,43%

Fonte – Autor (2021).

Notas:

TC – Traço Controle

DRM – Desvio Relativo máximo, conforme NBR 7215:2019 ($\leq 6\%$)

Repetitividade – NBR 7215:2019 ($\leq 10\%$)

Tabela 22 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda rodada de ensaios com sílica ativa

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS							
Traço	CP1(Mpa)	CP2(Mpa)	CP3(Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão	DRM	Repetitividade
TS-A5	47,34	49,41	48,11	48,29	0,85	2,33%	2,67%
TS-A7,5	45,95	48,32	49,33	47,87	1,42	4,00%	2,07%
TS-A10	41,02	41,24	42,50	41,59	0,65	2,20%	3,01%
TS-S5	42,02	48,37	49,98	46,79	3,44	10,19%	3,27%
TS-S7,5	47,67	47,54	49,79	48,33	1,03	3,01%	4,62%
TS-S10	36,59	36,85	36,57	36,67	0,13	0,50%	0,76%

Fonte – Autor (2021).

Notas:

DRM – Desvio Relativo máximo, conforme NBR 7215:2019 ($\leq 6\%$)

Repetitividade – NBR 7215:2019 ($\leq 10\%$)

Observa-se que alguns traços tiveram seus valores de Desvio Relativo Máximo maiores do que estabelecido pela NBR 7215 (ABNT, 2019), O CP1 do traço TC-1 como também o CP1 do traço TS-S5, ambos apresentaram falhas na compactação, o que pode justificar o alto valor de DRM.

Diante disso, seguindo recomendação presente na norma, foi eliminado o valor de resistência que mais se distânciava da média, chegando a um novo resultado como mostrado nas Tabelas 23 e 24 a seguir:

Tabela 23 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda rodada de ensaios com correção no DRM

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS							
Traço	CP1(Mpa)	CP2(Mpa)	CP3(Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão	DRM	Repetitividade
TC-1	49,77	56,96	58,95	57,96	1	1,72%	3,43%

Fonte – Autor (2021).

Notas:

TC – Traço Controle

CP – Corpo de Prova

DRM – Desvio Relativo máximo, conforme NBR 7215:2019 ($\leq 6\%$)

Repetitividade – NBR 7215:2019 ($\leq 10\%$)

Tabela 24 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da primeira rodada de ensaios com correção no DRM

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS							
Traço	CP1(Mpa)	CP2(Mpa)	CP3(Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão	DRM	Repetitividade
TS-A5	47,34	49,41	48,11	48,29	0,85	2,33%	2,67%
TS-A7,5	45,95	48,32	49,33	47,87	1,42	4,00%	2,07%
TS-A10	41,02	41,24	42,50	41,59	0,65	2,20%	3,01%
TS-S5	42,02	48,97	49,98	49,18	0,81	1,64%	3,27%
TS-S7,5	47,67	47,54	49,79	48,33	1,03	3,01%	4,62%
TS-S10	36,59	36,85	36,57	36,67	0,13	0,50%	0,76%

Fonte – Autor (2021).

Notas:

TC – Traço Controle

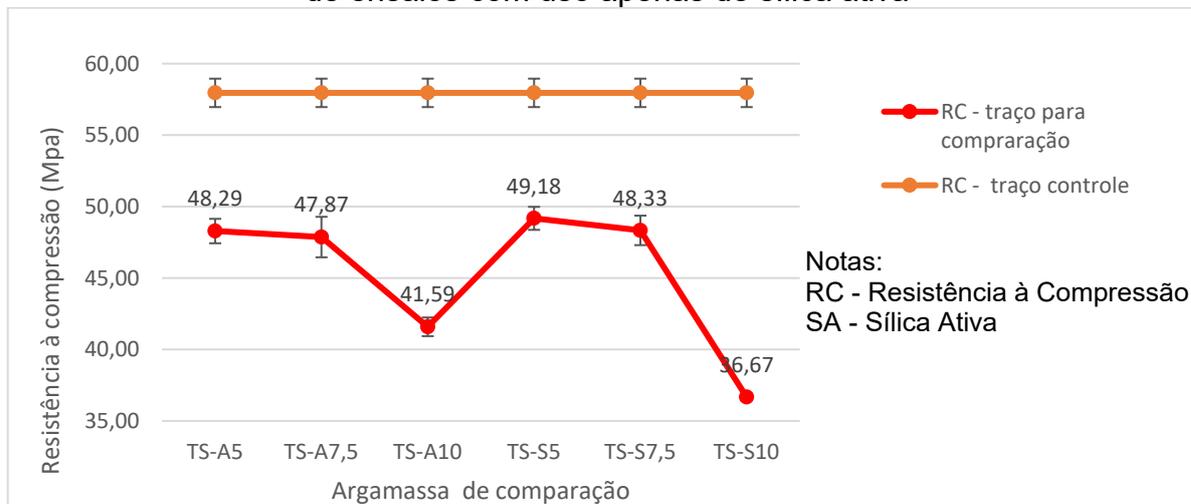
CP – Corpo de Prova

DRM – Desvio Relativo máximo, conforme NBR 7215:2019 ($\leq 6\%$)

Repetitividade – NBR 7215:2019 ($\leq 10\%$)

A partir desses novos dados, analisa-se o gráfico da Figura 14 para melhor compreender o comportamento de resistência a compressão aos 7 dias das argamassas com adição e substituição de sílica ativa.

Figura 14 – Gráfico de resistência à compressão das argamassas da segunda etapa de ensaios com uso apenas de sílica ativa



Fonte – Autor (2021).

As frações de sílica que tiveram maiores desempenho foram as com 5% e 7,5%, tanto em adição como em substituição, ganhando destaque a TS-S5 (traço com substituição de sílica ativa em 5%) que foi ligeiramente maior em relação as demais, apesar de todas terem sido inferior ao valor traço controle, o que já era de se esperar uma vez que o IC desses traços teve seus valores bem acima do IC considerado normal pela Norma 7215 (ABNT, 2019).

Em seguida, na Tabela 25, tem-se os traços com adição de sílica ativa nas frações de 5%, 7,5% e 10% e substituição de metacaulim nas porcentagens de 5% e 10% que foram submetidos ao ensaio de compressão após 7 dias de cura.

Tabela 25 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios com adição de 5% de sílica ativa e substituição de 5% de metacaulim

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS							
Traço	CP1(Mpa)	CP2(Mpa)	CP3(Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão	DRM	Repetitividade
T5S5M	49,01	48,08	50,45	49,18	0,97	2,58%	4,81%
T5S10M	28,38	32,7	30,04	30,37	1,78	7,66%	8,48%
T7,5S5M	50,55	48,78	51,46	50,26	1,11	2,95%	5,35%
T7,5S10M	39,52	41,12	39,7	40,11	0,72	2,51%	3,51%
T10S5M	48,98	45,79	50,64	48,47	2,01	5,53%	10,06%

Fonte – Autor (2021).

Notas:

TC – Traço Controle

CP – Corpo de Prova

DRM – Desvio Relativo máximo, conforme NBR 7215:2019 ($\leq 6\%$)

Repetitividade – NBR 7215:2019 ($\leq 10\%$)

Destaca-se que o traço T5S10M-1 teve seu valor de DRM e acima dos padrões estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 2019), devido falha na moldagem do CP1, sendo corrigido retirando o corpo de prova com valor de resistência que mais se afastou do valor médio, configurando no novo valor apresentado na Tabela 26 a seguir:

Tabela 26 – Resistência à compressão aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios com adição de sílica ativa e substituição de metacaulim

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS							
Traço	CP1(Mpa)	CP2(Mpa)	CP3(Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão	DRM	Repetitividade
T5S5M	49,01	48,08	50,45	49,18	0,97	2,58%	4,81%
T5S10M	28,38	32,7	30,04	31,37	1,33	4,24%	8,48%
T7,5S5M	50,55	48,78	51,46	50,26	1,11	2,95%	5,35%
T7,5S10M	39,52	41,12	39,7	40,11	0,72	2,51%	3,51%
T10S5M	48,98	45,79	50,64	48,47	2,01	5,53%	10,06%

Fonte – Autor (2021).

Notas:

TC – Traço Controle

CP – Corpo de Prova

DRM – Desvio Relativo máximo, conforme NBR 7215:2019 ($\leq 6\%$)

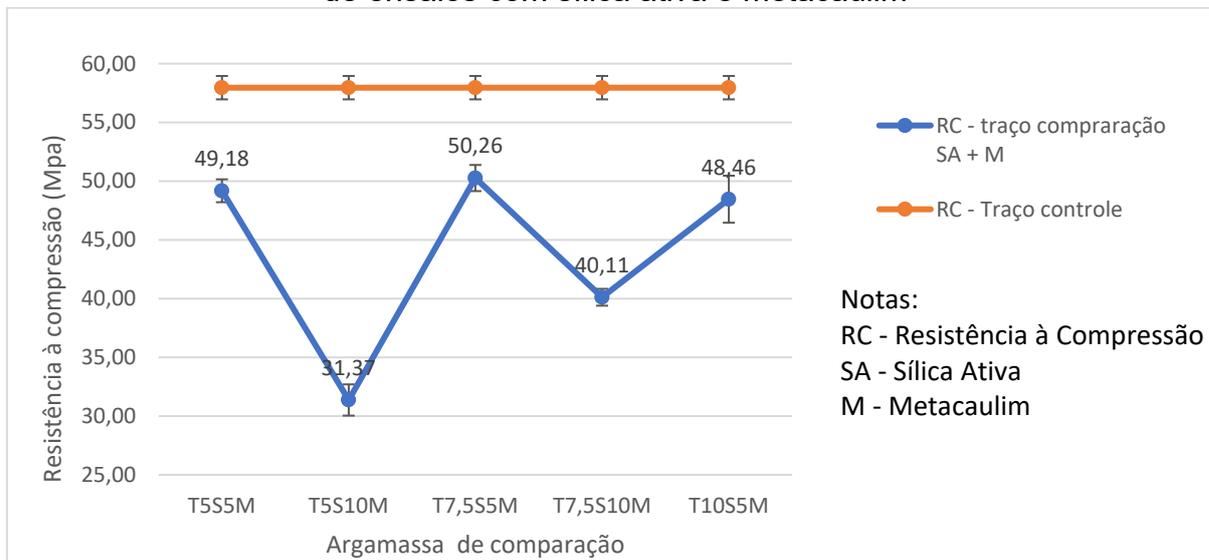
Repetitividade – NBR 7215:2019 ($\leq 10\%$)

Com esses dados foi elaborado o gráfico da Figura 15, que nos auxilia a visualizar o traço com as frações de sílica ativa mais metacaulim que tiveram melhores desempenho no ensaio de resistência à compressão após 7 dias de cura.

Observa-se com análise do gráfico da Figura 15 que os melhores valores de resistência à compressão foram os traços com frações de sílica ativa de 5%, 7,5% e 10% combinados com 5% de metacaulim, dando destaque para o T7,5S5M que foi ligeiramente maior em relação aos outros dois (T5S5M e T10S5M), apesar de todos terem sido inferior ao traço de controle.

Levando em consideração os valores do ensaio de IC no gráfico da Figura 11 o traço que apresentou melhor desempenho tanto em trabalhabilidade quanto em resistência mecânica foi o T10S5M.

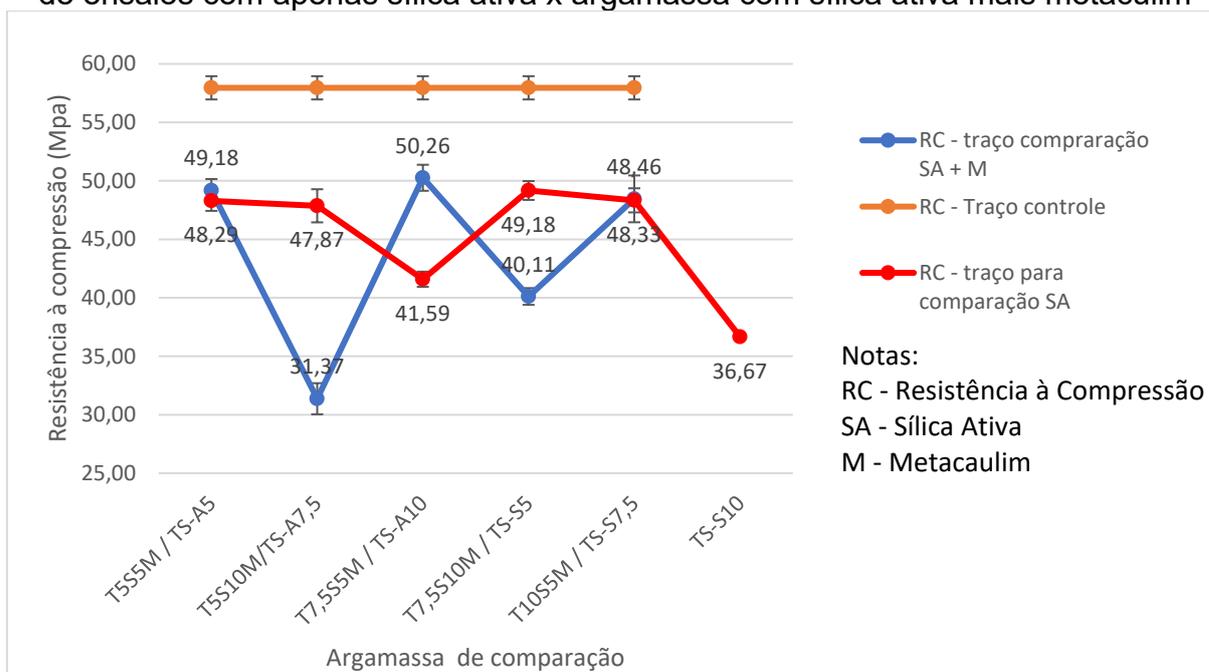
Figura 15 – Gráfico de resistência à compressão das argamassas da segunda etapa de ensaios com sílica ativa e metacaulim



Fonte – Autor (2021).

Comparando os gráficos da Figura 14 e 15 juntos (Figura 16) ressalta-se que os valores se aproximam em alguns pontos e em outros se opõem, porém os traços com sílica ativa e metacaulim acaba sendo ligeiramente maior se comparado com os traços que possuem apenas sílica ativa em sua composição.

Figura 16 – Gráfico de resistência à compressão das argamassas da segunda etapa de ensaios com apenas sílica ativa x argamassa com sílica ativa mais metacaulim



Fonte – Autor (2021).

5.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de tração por compressão diametral foram realizados nos corpos de prova após 7 dias de cura e nas argamassas com dosagem que combinava a utilização de sílica ativa nas frações 5%, 7,5% e 10% em adição em relação a massa do cimento mais metacaulim com as porcentagens de 5% e 10% em substituição em relação a massa do cimento.

Nas Tabelas 27 e 28 que se seguem tem-se os valores de resistência à tração por compressão diametral já convertidos pela Equação 01 conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011).

Tabela 27 – Resistência à tração aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AOS 7 DIAS					
Traço	CP1(Mpa)	CP2(Mpa)	CP3(Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão
TC-2	6,69	6,038	7,37	6,69	0,54

Fonte – Autor (2021).

Notas:

TC – Traço Controle
CP – Corpo de Prova

Tabela 28 – Resistência à tração aos 7 dias para os traços de controle da segunda etapa de ensaios com adição de sílica ativa e substituição de metacaulim

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AOS 7 DIAS					
Traço	CP4(Mpa)	CP5(Mpa)	CP6(Mpa)	Média (Mpa)	Desvio Padrão
T5S5M	4,73	4,60	4,91	4,74	0,13
T5S10M	4,08	4,48	6,31	4,99	0,96
T7,5S5M	3,27	5,48	4,64	4,46	0,91
T7,5S10M	4,73	4,99	4,95	4,89	0,12
T10S5M	3,83	5,87	5,23	4,98	0,85

Fonte – Autor (2021).

Notas:

TC – Traço Controle
CP – Corpo de Prova

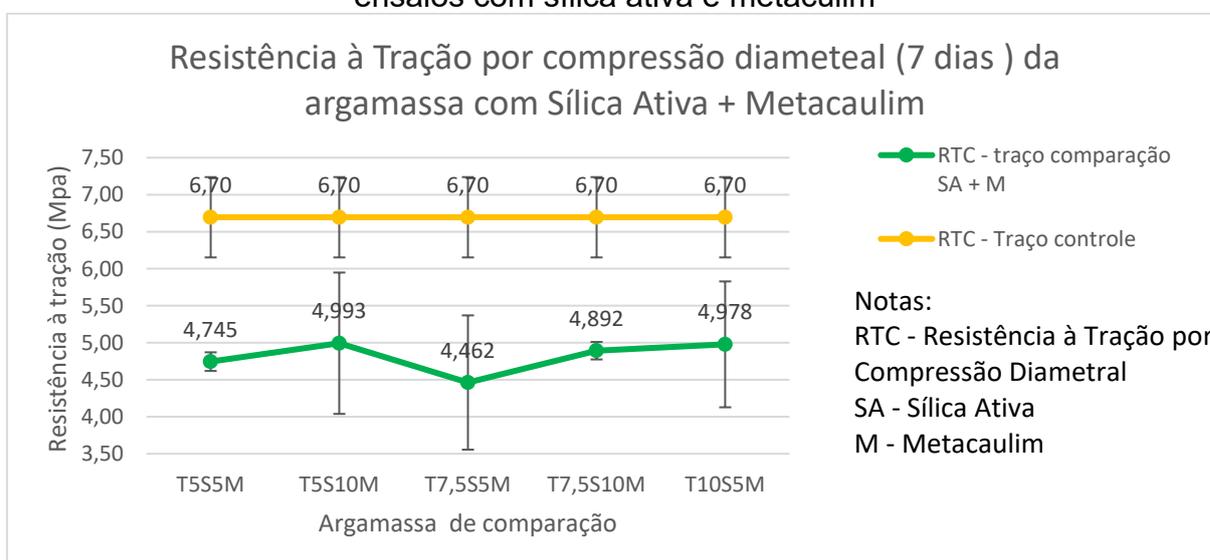
Alguns problemas foram observados durante o rompimento dos corpos de provas:

- Durante o rompimento do CP2 do traço TC-2 a prensa não parou depois de romper o corpo de prova, resultando no valor inferior aos demais CPs ensaiados.

- O traço T7,5S5M no CP3 e o traço T10S5M no CP3 apresentaram erro de moldagem observado após rompimento, devido a presença de grandes vazios em seu interior.

É possível observar, com auxílio da Tabela 26 em conjunto com o gráfico da Figura 17, que o traço que obteve maior resistência à tração por compressão diametral foi o T5S10M, composto por 5% de sílica ativa em adição mais 10% de metacaulim e o T10S5M, composto por 10% de sílica ativa em adição e 5% de metacaulim em substituição.

Figura 17 – Gráfico de resistência à tração das argamassas da segunda etapa de ensaios com sílica ativa e metacaulim



Fonte – Autor (2021).

Com esses resultados temos que a argamassa com sílica e metacaulim que teve o melhor resultado, levando em consideração a resistência mecânica e o ensaio de IC, foi a argamassa T10S5M com 10% sílica ativa combinadas com 5% de metacaulim, que obteve um IC de 162,3 mm dentro dos padrões considerado normal pela NBR 7215 (ABNT, 2019) e uma resistência à compressão e à tração por compressão diametral de 48,46 Mpa e 4,98 Mpa respectivamente. Apesar dos valores de resistência à compressão ter sido o terceiro maior valor, e o de tração por compressão diametral o segundo maior, ao se analisar o conjunto de todos os ensaios realizados para essa argamassa (Índice de Consistência e resistência mecânica), chega-se à conclusão que ele foi o que obteve melhor desempenho tanto no estado fresco, como no estado endurecido.

6 CONCLUSÃO

Tem-se notado uma grande preocupação com meio ambiente, e o tema sustentabilidade tem sido cada vez mais pautado nas discussões entre as pessoas. Várias pesquisas foram desenvolvidas com intuito de viabilizar a utilização de materiais que possam substituir, mesmo que em pequenas frações o uso do cimento, materiais esses que originalmente seriam descartados como rejeito de produção na natureza.

Esses materiais são os chamados Materiais Cimentícios Suplementares, que possuem propriedades pozolânicas parecidas com as propriedades presentes no cimento; que ao entrar em contato com a água, ocorrem processos químicos que possibilitam ao material desenvolver um nível de dureza semelhante ao que é visto com a utilização apenas do cimento Portland.

A primeira etapa de ensaios foi realizada com argamassas com diversas granulometrias de agregado miúdo e diversas frações de plastificante e superplastificante. É possível concluir que o traço com melhor desempenho foi o SP-AF2, que contém agregado miúdo passante na peneira 0,6 mm sem material pulverulento do fundo e aditivo superplastificante com 0,8% em relação a massa do cimento, apesar de não ter sido o que atingiu maior valor resistência à compressão, chegando no valor médio de 58,15 Mpa, e foi o traço que obteve um índice de consistência no valor de 167,5 mm próximo do valor que a NBR 7215 (ABNT, 2019) considera como normal. Sendo assim, essas foram as variáveis escolhidas para compor as argamassas da segunda etapa de ensaio que consistia no uso de MCS.

Na segunda etapa de ensaio, com a granulometria e aditivos definidos, foram usados na composição dos traços os materiais cimentícios suplementares, sendo confeccionadas argamassas com apenas sílica ativa em adição e substituição, ambas nas frações de 5%, 7,5% e 10%. E argamassa com adição de sílica ativa também nas frações de 5%, 7,5% e 10% em conjunto com a substituição de metacaulim nas frações de 5% e 10%.

Desta forma, ressalta-se que os traços confeccionados apenas com sílica ativa, os melhores valores de resistência à compressão foram aqueles confeccionados com substituição à massa do cimento, tendo destaque para o TS-S5, como traço que teve melhor desempenho de resistência à compressão. E a argamassa com sílica e

matacaulim que teve o melhor resultado, levando em consideração a resistência mecânica e o ensaio de IC, foi a argamassa T10S5M com 10% sílica ativa combinadas com 5% de metacaulim.

Apesar de todos os resultados dos ensaios de resistência mecânica terem sido abaixo do valor obtido pelo traço controle, (aqueles que não usava nenhum MCS) pode-se ainda assim afirmar que eles conseguem proporcionar uma boa resistência a argamassa no seu estado endurecido como também proporciona uma boa trabalhabilidade no seu estado plástico. Deve-se ainda constatar que os valores abaixo podem ter sido causados pelas falhas presentes nos CPs verificadas após o desmolde. Sem falar que a mudança no processo de preparo pode ter influenciado na variação do resultado obtido.

Sendo assim, destaca-se que a combinação de diferentes MSC proporciona melhores resultados de resistência mecânica do que se utilizadas de forma separadas, logo, o estudo de materiais cimentícios suplementares é válido e pode ser aprimorado, padronizando as técnicas de confecção e estudando diversas outras combinações, com diferentes tipos de materiais com propriedades pozolânicas, contribuindo desse modo a encontrar uma composição que realmente seja viável a substituição, mesmo que parcial do cimento Portland.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, P. C. R. A.. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. 2019. 144 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- ALMEIDA, D. C. de. **Desempenho de argamassas com sílica ativa em ambiente marinho**. 2007. 129 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa Pós-Graduação, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C-270: **Standard specification for mortar for unit masonry**. United States, 2019.
- AMTHAUER, P. R.. **Argamassa de assentamento – Ima verificação do estágio atual na cidade de Ijuí**. 2001. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1998. **NBR 7200/1998 - Execursão de revestimentos de paredes e tetos de argamassa inorgânicas**, Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2005 **NBR 7211/2005 – Agregados para concreto – Especificações**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2006 **NBR 12655/2006 – Concreto de cimento Portland – Preparo controle e recebimento - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2006 **NBR NM 45/2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2011 **NBR 7222/2011 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2011 **NBR 11768/2011 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2011 **NBR 9935/2011 – Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2012 **NBR 13956/2012 – Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2014 **NBR 12653/2014 – Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016 **NBR 13276/2016 – argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2018 **NBR 16697/2018 – Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2019 **NBR 7215/2019 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2005 **NBR 13281/2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1995 **NBR 13530/1995 – Revestimento de paredes e tetos de argamassa inorgânicas**. Rio de Janeiro, 1995.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. 2009 **NM 52/2009 - Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Mercosul, 2009.

BABAK, F.; Abolfazl, H.; Alimorad, R.; Parviz, G. **Preparation and Mechanical Properties of Graphene Oxide: Cement Nanocomposites**. 2014. 10 f. The Scientific Word Journal. Hindawi Publishing Corporation.

BAÍA, L. L. M; SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa**: Coleção Primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. 1º ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. 82p.

BASTOS, A. P. O. **Análise da influência de aditivos superplastificantes no comportamento de pastas de cimento Portland com e sem adição de filer calcário**. 2016. 91 f. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2º ed. São Paulo: IBRACON, 2010. 1712p.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

COLEMAN N.J. & MCWHINNIE W.R. The solid state chemistry of metakaolin-blended Ordinary Portland cement. **Journal of Materials Science**, p. 2701–2710, 2000.

CONTERATO, L. **Rochas Basálticas: Obtenção de Parâmetros Elásticos pelo Ensaio de Tração Indireta**. 2011. 60 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia civil da Escola de Engenharia, Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**. Vol. 1 e 2. São Paulo: IBRACON, 2011. 1712 p.

DAL MOLIN, D. C. C.; SCHULER, A. **Estudo a respeito da aderência de argamassas com adição de microssilica sobre o concreto endurecido, suas propriedades mecânicas e possibilidade de uso em reforços estruturais**. Relatório de Pesquisa. CPGEC, UFRGS, 1993.

DIAS, J. A.. **A análise sedimentar e o conhecimentos dos sistemas marinhos: Uma introdução à Oceanografia Geológica**. (Versão Preliminar). Faro: universidade do Algarve, 2004. 90 p.

DUBAJ, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre**. 2000. 115 f. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

DUTRA, M. B.. **Produção de concreto com areia de granulometria ótima obtida do resíduo da mineração de quartzo**. 2015. 89 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

FARIA, P.; SANTOS, T.; AUBERT, J. Experimental Characterization of an Earth Eco-Efficient Plastering Mortar. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 1, Jun. 2015.

FILHO, J. R. da S.. **Estudo da resistência mecânica de argamassas utilizadas para recuperação de estruturas de concreto**. 2013. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2013.

GELARDI, G et al. Chemistry of Chemical admixtures. In. AÏTCIN, P. C., FLATT, J. R. **Science and Technology of Concrete admixtures**. Cambridge. Woodhead Publishing, 2016. 668 p.

HELENE, P. R. L.; TERSIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1992. 349p.

HANAI, J. B. de. **Argamassa armada. Projeto estrutural e dimensionamento com telas soldadas**. São Paulo: Ibts, 1996. 54p.

ISAIAS, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. Vol. 1 e 2. São Paulo: Ibracon, 2011. 1712p.

JÚNIOR, T. S. dos S.; SILVA, I. D. G. da; BORJA, E. V. de. **Argamassa para reforço estrutural com adição de metacaulim**. VII CONNEPI, 2012.

KULAKOWSKI, M.P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concreto e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199 f. Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LITVAN, G.G.; MEYER, A. Carbonation for granulated blast furnace slag cement concrete during twenty Years of field exposure. In: Malhotra, V.M. ed., **FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE**. Vol. 2. Detroit: ACI SP-91, 1986. 1445-1462 p.

MATTOS, F. C. de; GONÇALVES, M. R. F.. Argamassa de cal e metacaulim: influência das condições de cura. **Revista Matéria**, v. 24, n. 4, 2019. ISSN 1517-7076.

MARTINELLI, F. A.. **Uso, funções e propriedades das argamassas mistas destinadas ao assentamento e revestimento de alvenarias**. 1991 Boletim Técnico – Série BT/PCC. CDU 691.53. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

MOIR, G. Cements. In: Newman, J. & Choo, B. S. **Advanced Concrete Technology: Constituent Materials**. Oxford, Reino Unido: Elsevier, 2003. 281p.

MORAIS, J. B. **Reforço de vigas de concreto armado: comparativo entre de custo e consumo de material entre uso de chapas de aço e de fibra de carbono**. 2017 103 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R. A. de; CARNEIRO, A. M. P.. Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria. **Revista Matéria**, v. 21, n. 4, p. 1105-1116, 2016

MARTINS, C. V. M. **Análise granulométrica e distribuição dos parâmetros de forma e textura de areias através do processamento de imagens digitais**. 2020. 90 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Especialização em Geotecnia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2020.

MARTINS, M. M. **Investigação da influência do uso de materiais cimentícios suplementares em substituição ao cimento Portland**. 2018. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

- MASSAZZA, F. Pozzolanic Cements. **Cement & Concrete Composites**, v.15, p.185 - 214, 1993.
- MAAGE, M.; SELLEVOLD, E.J. Effect of microsilica on the durability of concrete structures. **Concrete International**, V.9, n. 12, p.39-43, jan. 1987.
- MAURY, M.B.; BLUMENSCHNEIN, R.N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente, **Sustentabilidade em Debate** - Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jun. 2012
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2° ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 782p.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573p.
- MENOSSEI, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. 110 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5° ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912p.
- NITA, C.; JONH, V. M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. 2007 Boletim Técnico – Série BT/PCC. ISSN 0103-9830. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- OLIVEIRA, J. V. da C.; LIRA, M. de N.; LUCENA, K. F. M. de; CHAGAS, L.S. V. B.; MEIRA, F. F. D. de A.. **Determinação de formulações para estudo laboratorial de concretos especiais de alta resistência**. Anais III CONAPESC... Campina Grande: Realize Editora, 2018. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/43063>>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- PASSOS, P. M.; JUNGBLUT, M. E.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.. Caracterização de metacaulins e sua potencial contribuição em propriedades de concretos e argamassas. In: **60° Congresso Brasileiro do Concreto**, 2018, Foz do Iguaçu. Anais do 60° Congresso Brasileiro do Congresso. V. 1. São Paulo: IBRACON, 2018.
- QUADRO, P. A.. **Estudo das correlações entre as propriedades mecânicas do concreto**. 2014. 105 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- RAO, G. A.. Role of water-binder ratio on the strength development in mortars incorporated with sílica fume. Department of Civil Engineering, Indian. Institute of Science, Bangalore 560 012, India. **Cement and Concrete Research**, n. 31, p. 443-447, 2001.

RECENA F. A. P.. **Conhecendo argamassa**. 2º ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2012 192p.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. 114 f. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/1843/BUDB-8AKG76>>. Acessado em: 28 jun. 2021.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 4. ed. rev. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013. 212p.

RIXOM, R.; MAILVAGANAM, N. **Chemical Admixtures for concrete**. 3º ed. New York: Taylor & Francis, 2001. 593 p.

SABBATINI, F. H.. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria estrutural**. Boletim Técnico 02/86. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

SAHMARAN, M. et al. Influence of Aggregates Type and Size on Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites. **ACI Materials Journal**, p. 308-316, Jun. 2009.

SANTOS, W.J. **Argamassas de Alto Desempenho**. 2011. 209 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade Federal Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

SCHEIDEGGER, G.M.; CALENZANI, C.L. Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 04, Ed. 03, Vol. 05, p. 68-92. Mar. 2019. ISSN: 2448-0959.

SCHUEREMANS, L, CIZER, Ö, JANSSENS, E, SERRÉ, G, AND VAN BALEN, K. Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice. **Constructions and Building Materials**, 25, p. 4338-4350, dez. 2011.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. 1989. 227 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1989.

SHANNAG, M. J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. Department of Civil Engineering, Jordan University of Science and Technology, Irbid 22110, Jordan. **Cement e Concrete Composites**, n. 22, p. 399-406, 2000.

SILVA, D. S. da; SILVA, D. L. da; BENTO, A. J.; FONSECA, M. M. da. **Avaliação da resistência à compressão de concreto com substituição de metacaulim**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Alagoa, Maceió. Ago. 2018.

SILVA, F. G. da; LIBORIO, J. B. L.. **A importância da seleção de materiais para concretos de elementos estruturais submetidos à ação de cloretos.** 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em concreto Pré-moldado. São Carlos, 2005.

SIMÃO, D. W. da G.; LIMA, J. A. G. da; PARENTE, L. H. C. D.; MOTA, J. M. de F.; SILVA, A. C. e. **Avaliação de propriedades de concreto produzidos com três tipos de cimento na região do Agreste de Pernambuco.** Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC 2009 – 51BCC0000. Ibracon, 2009.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **SNIC 50 Anos.** Rio de Janeiro 2006b. disponível em: <<http://snic.org.br/historia.php>>, acesso em: 10 de abril de 2021.

SOUZA, M. M.; CAMARA, T. A.; AKASAKI, J. L.. Estudo do teor de metacaulim em concretos de alto desempenho. **Revista científica ANAP Brasil**, v. 9, n. 17, 2016. ISSN 1984-3240.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da Viabilidade do Uso de Argilas Calcinadas, Como Metacaulim de Alta Reatividade (MCAR). **Engenharia Civil-UM**, v. 15, p. 45-54, set. 2002.

TEODORO, R. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade.** 2016. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/6544>>. Acesso em: 29 jun. 2021.

TRISTÃO, F.A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento.** 2005. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TRISTÃO, F.A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento.** 1995. 218 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

VAN BALEN, K., PAPAYIANNI, I., VAN HEES, R., BINDA, L., AND WALDUM, A. Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. **Materials and Structures**, 38, p 781-785, Out. 2005.

VENDAS de cimento mantêm crescimento em setembro. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2020. Disponível em: <<https://abcp.org.br/imprensa/noticias/vendas-de-cimento-mantem-crescimento-em-setembro/>>. Acesso em: 25 de jul. de 2021.

VELOSA, A. L.; ROCHA, F.; VEIGA, M. R. Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v.6, n. 1, p.121-126, Jan. 2009.