



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

BRUNO VOLPATO DA SILVA

OTÁVIO PATRÍCIO MATEUS JUNIOR

**USO DE RESÍDUOS DE TELHAS CERÂMICAS COMO MATERIAL CIMENTÍCIO
SUPLEMENTAR EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND**

Tubarão

2021

BRUNO VOLPATO DA SILVA
OTÁVIO PATRÍCIO MATEUS JUNIOR

USO DE RESÍDUOS DE TELHAS CERÂMICAS COMO MATERIAL CIMENTÍCIO
SUPLEMENTAR EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
do Sul de Santa Catarina como requisito parcial
à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^a. Lucimara Aparecida Schambeck Andrade, Ms.

Tubarão

2021

BRUNO VOLPATO DA SILVA
OTÁVIO PATRÍCIO MATEUS JUNIOR

USO DE RESÍDUOS DE TELHAS CERÂMICAS COMO MATERIAL CIMENTÍCIO
SUPLEMENTAR EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 22 de junho de 2021.



Lucimara A. S. A.

Professora e orientadora Lucimara Aparecida Schambeck Andrade, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina



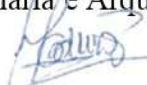
Prof. Charles Mendes de Souza, Esp.

Universidade do Sul de Santa Catarina



Engenheiro Civil Diego de Souza Concer, Esp.

Concer Engenharia e Arquitetura LTDA



Rennan Medeiros da Silva, (aluno de doutorando).

Ottawa University

Dedica-se este trabalho a todos os familiares e amigos dos referentes autores.

AGRADECIMENTOS OTÁVIO

Primeiramente, quero agradecer aos meus pais, minhas maiores referências na vida, Maria de Lourdes das Neves Mateus e Otávio Patrício Mateus. Agradecê-los por todo o aprendizado repassado durante todos esses anos, corrigindo-me e incentivando-me a sempre melhorar, mostrando o caminho certo para a minha formação como pessoa. Obrigado por tudo, sou eternamente grato por terem vocês como os meus pais.

À minha irmã Júlia das Neves Mateus, por ser sempre prestativa as minhas chamadas e a todo o auxílio realizado durante o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, obrigado por tudo que já fizestes por mim, não desistindo nos momentos mais difíceis que passamos nesta vida, sempre ajudando-me a tornar uma pessoa melhor. Saiba que você é um grande exemplo de pessoa para mim. Grato por ser o seu irmão mais novo.

Ao meu irmão, Júlio das Neves Mateus, por todo apoio e ensinamento repassado ao longo de minha vida.

Aos meus amigos de curso, que certamente irei levar para toda vida, Antônio Ângelo Weis, Ailton Serafim, Dhener Martins, Laisy Meurer Perin e Pedro Antônio Pimentel Zapelini. Agradeço vocês por todo apoio e incentivo depositado em minha pessoa.

Meus agradecimentos ao meu amigo e parceiro de pesquisa, Bruno Volpato da Silva, sempre comprometido com o desenvolvimento do trabalho, pela confiança depositada em mim. Além disso, obrigado por toda ajuda durante o curso, sempre se mantendo prestativo nos momentos bons e difíceis dessa caminhada.

Aos meus professores Lucimara Aparecida Schambeck Andrade e Rennan Medeiros da Silva, por toda ajuda, apoio e conhecimento transmitido para o desenvolvimento desta pesquisa e para a minha formação como profissional.

Agradeço a presença do professor Charles Mendes de Souza, pelos ensinamentos repassados durante o curso e por ter aceito fazer parte da banca avaliadora desta pesquisa.

Agradeço também ao meu grande amigo e professor, Diego de Souza Concer, por se fazer presente na banca avaliadora, aos ensinamentos técnicos de engenharia e aos demais conhecimentos de diversas áreas, transmitidos durante minha formação profissional ao longo destes últimos anos vividos. Obrigado por tudo, certamente levarei esta amizade para toda a vida.

Sou grato a todas as pessoas que passaram pela minha vida nestes últimos anos, pessoas que me ajudaram a crescer, agregando conhecimentos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa e contribuindo no meu desenvolvimento pessoal. Obrigado!

AGRADECIMENTOS BRUNO

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus que me deu forças nos momentos mais difíceis tanto em minha vida quanto ao longo da graduação.

A minha mãe, Evandra, por todo carinho e amor, e por sempre me incentivar a e me tornar uma pessoa melhor. Sem você eu não seria nada, muito obrigado por estar tão presente durante toda minha vida.

A minha namorada, Aurora, por sempre me apoiar em todos os momentos e por ser um anjo na minha vida, obrigado por ser essa pessoa tão especial, te amo.

Ao professor Rennan Medeiros, por fazer parte da banca avaliadora, por todo conhecimento que nos passou e pela ajuda com a confecção deste trabalho, muito obrigado.

A professora Lucimara Schambeck, pela prontidão para esclarecimento de dúvidas e pelo auxílio na realização deste trabalho, muito obrigado.

Ao professor Charles Mendes de Souza por fazer parte da banca avaliadora e por todo o conhecimento repassado ao longo do curso, muito obrigado

Ao professor Diego de Souza Concer, por aceitar fazer parte da banca avaliadora.

A minha dupla, Otavio, pelos dias e madrugadas dedicados, pelo comprometimento, pela competência e por todo esforço que realizamos juntos para conseguir concluir este trabalho. Tenho certeza que você vai ser tornar um excelente profissional e vai conseguir alcançar todos os seus objetivos, muito obrigado pela parceria ao longo do curso.

Ao pessoal do LEC, Laisy Meurer Perin e Pedro Antônio Pimentel, pelo profissionalismo e por toda a ajuda na realização dos ensaios em laboratório, muito obrigado.

Aos amigos que fiz nestes últimos anos e que estiveram presentes ao longo da graduação, muito obrigado pelo apoio e pelo companheirismo.

“Saber muito não lhe torna inteligente. A inteligência se traduz na forma que você recolhe, julga, maneja e, sobretudo, onde e como aplica esta informação” (Carl Sagan).

RESUMO

Com a evolução das construções, e a rápida urbanização das cidades, houve um grande desenvolvimento na área de materiais para atender melhor a demanda no ramo da construção civil. Entretanto, é sabido dos impactos ambientais negativos causados pelo processamento destes materiais, principalmente do cimento, que libera uma grande quantidade de CO₂ no momento de sua fabricação. Com o intuito de reduzir a utilização do cimento na construção, foi elaborada tal pesquisa para avaliar o uso do resíduo cerâmico beneficiado em substituição parcial do cimento nas propriedades da argamassa e do concreto no estado fresco e endurecido. Para o desenvolvimento do trabalho, foram coletadas amostras de telhas cerâmicas proveniente do município de Sangão-SC, a qual foi beneficiada e estudada em sua granulometria passante na peneira de 45µm. No quesito de caracterização química e física do MCS, foram realizados os ensaios de espectroscopia por fluorescência de raio X, análise por difração por raio X, microscopia eletrônica de varredura e granulometria a laser. Após estes ensaios, foram feitos os testes em argamassa no estado fresco, para determinar sua viscosidade (Mini V Funil), sua fluidez (Mini Slump) e a densidade real (Método Gravimétrico). Posteriormente, analisou-se os resultados no estado endurecido da argamassa, através do ensaio de compressão axial. Por fim, com relação ao concreto, foram feitas as verificações de abatimento (Slump Test) e resistência à compressão, para 3, 7 e 28 dias. Portanto, verificou-se a eficácia do resíduo beneficiado da telha cerâmica, validando seu potencial em substituição parcial do cimento Portland em argamassas e concretos.

Palavras-chave: Argamassa. Concreto. Material Cimentício Suplementar.

ABSTRACT

With the evolution of constructions, and the rapid urbanization of cities, there was a great development in the area of materials to better meet the demand in the civil construction sector. However, it is known of the negative environmental impacts caused by the processing of these materials, mainly cement, which releases a large amount of CO₂ at the time of its manufacture. In order to reduce the use of cement in construction, this research was designed to evaluate the use of processed ceramic waste in partial replacement of cement in the properties of mortar and concrete in the fresh and hardened state. For the development of the work, samples of ceramic tiles were collected from the municipality of Sangão-SC, in which it was benefited and studied in its passing granulometry in the 45µm sieve. In terms of chemical and physical characterization of the MCS, X-ray fluorescence spectroscopy, X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy and laser particle size were performed. After these tests, tests were carried out in fresh mortar, to determine its viscosity (Mini V Funnel), its fluidity (Mini Slump) and its real density (Gravimetric Method). Subsequently, the results were analyzed in the hardened state of the mortar, through the axial compression test. Finally, with regard to concrete, the slump test and compressive strength were checked for 3, 7 and 28 days. Therefore, the effectiveness of the waste processed from ceramic tile was verified, validating its potential in partial replacement of Portland cement in mortars and concretes.

Keywords: Mortar. Concrete. Supplementary Cement Material.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Emissões de CO ₂ por tonelada de produtos cimentícios (kg/ton).....	17
Figura 2 – Difratoograma de raio X.....	23
Figura 3 – Organograma experimental da pesquisa.....	33
Figura 4 – Moinho de bolas utilizado no processo de beneficiamento.....	34
Figura 5 – Material retido na peneira.....	39
Figura 6 – Ensaio do frasco de Le Chatelier	40
Figura 7 – Diagrama de fluorescência de Raio - X.....	42
Figura 8 – Curva de evolução de calor, método calorímetro semi-adiabático, análise dos teores em argamassa.....	43
Figura 9 – Curva de evolução de calor, método calorímetro semi-adiabático, análise dos teores em concreto.	43
Figura 10 – Espalhamento Estático e Método Gravimétrico	44
Figura 11 – Demanda de água por traço de argamassa.....	45
Figura 12 – Gráfico de Espalhamento e Teor de Ar Incorporado	45
Figura 13 – Tempo de Escoamento no Funil V	46
Figura 14 – Demanda de água por traço de concreto.....	47
Figura 15 – Perda de abatimento por traço de concreto.....	48
Figura 16 – Abatimento do concreto para o traço referência	48
Figura 17 – Abatimento do concreto para o traço de 10% de substituição	49
Figura 18 – Abatimento do concreto para o traço de 30% de substituição	49
Figura 19 – Resultados obtidos para os ensaios de compressão em argamassa	50
Figura 20 – Resultados obtidos para os ensaios de compressão em concreto.....	50
Figura 21 – Vendas de cimento acumulado em 12 meses	51
Figura 22 – Custo local por tonelada de aglomerante.....	52
Figura 23 – Custo total por m ³ de concreto.....	52
Figura 24 – Custo total por m ³ de argamassa	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da massa cerâmica.....	23
Tabela 2 – Composição química.....	29
Tabela 3 – Características físicas.....	30
Tabela 4 – Características do aditivo	30
Tabela 5 – Características dos agregados empregados	31
Tabela 6 – Traços unitários em volume absoluto das argamassas.....	36
Tabela 7 – Traços unitários utilizados na produção das argamassas	36
Tabela 8 – Proporcionamento dos materiais para confecção de 1 m ³ de concreto.....	37
Tabela 9 – Proporcionamento dos materiais para produção de 12L do concreto da pesquisa. 37	
Tabela 10 – Características físicas do resíduo cerâmico.....	40
Tabela 11 – Composição química do resíduo cerâmico beneficiado.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CDC – Central Dosadora de Concreto

CP – Corpo de Prova

CP V–ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

IAP – Índice de Atividade Pozolânica

MCS – Material Cimentício Suplementar

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira

PVC – Policloreto de vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2 – Dióxido de Carbono

CaCO_3 – Carbonato de Cálcio

CaO – Óxido de Cálcio

Kg/ton – Quilograma por tonelada

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

CH – Benzeno

PF – Ponto de fusão

pH – Potencial hidrogeniônico

C_3S – Silicato tricálcico - Alita

C_2S – Silicato bicálcico - Belita

C_3A – Aluminato tricálcico - Celita

C_4AF – Ferro aluminato tetracálcico - Ferrita

fcB – resistência média final da argamassa B

fcA – resistência média final da argamassa A

δ_{poz} – Massa específica da pozolana

δ_{cal} – Massa específica da cal

g/cm^3 – Gramas por centímetros cúbicos

g – Gramas (unidade de massa)

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius (unidade de temperatura)

ml – mililitro

μm – micrômetro

$I\text{Ca}(\text{OH})_2$ – índice de atividade pozolânica

V3 – volume necessário para titulação da solução com material pozolânico

V2 – volume necessário para titulação da solução padrão

Fc – fator de correção do HCl

m_2 – massa do material pozolânico

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de cálcio

mm – milímetros

a/ag – Relação água/aglomerante

a/c – Relação água/cimento

cm – centímetros

ppm – Partes por milhão

Kg/m^3 – Quilogramas por metros cúbicos

K_2O – Óxido de Potássio

MnO – Óxido de Manganês

Na_2O – Óxido de Sódio

P_2O_2 – Dióxido de Difósforo

TiO_2 – Dióxido de Titânio

B_2O_2 – Dióxido de Diborane

Li_2O – Óxido de lítio

BaO – Óxido de Bário

Ca_2O_3 – Trióxido de Ca

Cr_2O_3 – Óxido de Cromo (III)

PbO – Óxido de Chumbo

SrO – Óxido de Estrôncio

ZnO – Óxido de zinco

ZrO_2 – Dióxido de Zircônio

HfO_2 – Dióxido de háfnio

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

CaO – Óxido de Cálcio

Fe_2O_3 – Óxido de ferro (III)

SO_3 – Trióxido de Enxofre

MgO – Óxido de Magnésio

SiO_2 – Dióxido de Silício

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Cálculo do índice de atividade pozolânica do cimento Portland	26
Equação 2 - Determinação da massa de material pozolânico para o traço	27
Equação 3 - Determinação do Hidróxido de Cálcio fixado	27
Equação 4 - Determinação do teor de argamassa para a produção de concreto	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 RESÍDUO DE TELHA CERÂMICA.....	21
2.1.1 Características físicas e químicas	22
2.1.2 Atividade Pozolânica.....	24
2.1.3 Métodos para a determinação da Atividade Pozolânica.....	24
2.1.4 Métodos normatizados para a avaliação da influência dos MCS nas propriedades do concreto	25
2.1.4.1 Índice de Atividade Pozolânica com o Cimento Portland	25
2.1.4.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cal.....	26
2.1.4.3 Chapelle Modificado	27
2.2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	29
3.1.1 Cimento Portland.....	29
3.1.2 Água.....	30
3.1.3 Aditivo	30
3.1.4 Agregados.....	31
3.1.5 Material Cimentício Suplementar	31
3.2 CARACTERÍSTICAS DO ESTUDO REALIZADO	32
3.3 MÉTODOS	32
3.3.1 Determinação do grau de moagem	34
3.3.2 Ensaio de massa específica.....	35
3.3.3 Determinação das características físicas	35
3.3.4 Determinação da composição química	35
3.3.5 Ensaios em pasta	35
3.3.6 Estudo em argamassa	36
3.3.7 Estudo em concreto	37

3.3.7.1	Determinação do teor de argamassa ideal	37
3.3.7.2	Determinação da perda de abatimento	38
3.3.7.3	Determinação da demanda de água	38
3.3.7.4	Determinação da resistência à compressão axial	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	DETERMINAÇÃO DO GRAU DE MOAGEM	39
4.2	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA	39
4.3	DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	40
4.4	DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	41
4.5	ENSAIOS EM PASTA.....	42
4.6	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	44
4.6.1	Ensaaios em argamassa	44
4.6.2	Ensaaios em concreto.....	46
4.7	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	49
4.8	ANÁLISE ECONÔMICA E DO IMPACTO DO USO	50
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

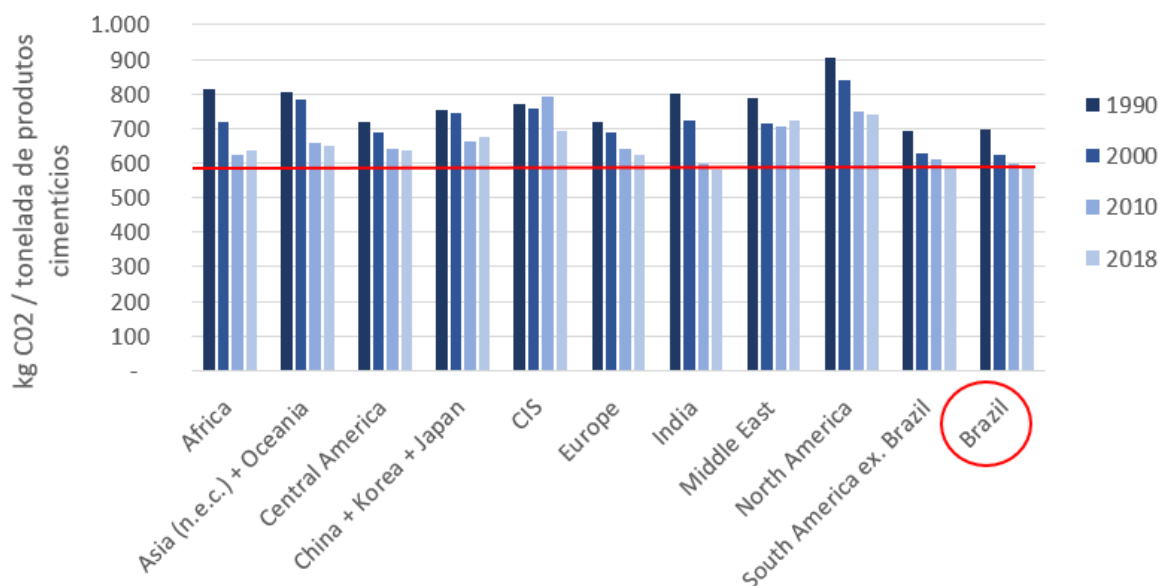
Com o grande aumento do consumo do cimento Portland nos últimos anos pela sociedade, o concreto se torna o segundo material mais consumido no mundo, contribuindo para o avanço tecnológico da humanidade com obras de infraestrutura, e com a construção de edifícios familiares e comerciais.

Entretanto, o processo de produção de cimento Portland emite grandes quantidades de CO₂ na atmosfera. Dependendo do país de produção, até uma tonelada de CO₂ por tonelada de cimento pode ser emitida (DAL MOLIN, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SCHNEIDER, 2015; CELIK, et al., 2015). Portanto, tal método construtivo acaba se tornando insustentável, pelo fato de a matéria prima ser oriunda de fontes não renováveis e durante seu processo de queima ser muito degradante ao meio ambiente, além de ser necessário um alto consumo de energia, (MAURY; BLUMENSCHNEIN, 2012).

A indústria do cimento é responsável por aproximadamente 6% das emissões de CO₂ e aproximadamente metade dessas emissões provêm da reação química (clinkerização) da transformação do calcário (CaCO₃) para óxido de cálcio (CaO) (WBCSD, 2012). Nas emissões específicas da indústria do cimento, aproximadamente 40% referem-se ao processo produtivo do cimento, gerado pela queima de combustíveis fósseis, cerca de 5% ao transporte de matéria-prima e 5% ao uso da eletricidade (WBCSD, 2012).

Como afirma Rezende (2016), o Brasil apresenta um dos menores índices de emissão de CO₂ do mundo (Figura 1), pelo fato de sua matriz energética ter uma parcela renovável considerável, pois a maioria das fábricas seguem o processo a seco, além de utilizar frequentemente pré-calcinadores, potencializando a eficiência da indústria brasileira.

Figura 1 – Emissões de CO₂ por tonelada de produtos cimentícios (kg/ton)



Fonte: Global Cement and Concrete Association, 2020, n.p.

Diante desse contexto, pesquisas relacionadas à substituição do cimento Portland por materiais com propriedades cimentícias estão sendo desenvolvidas, com o intuito de diminuir seu consumo no mundo e mantendo a segurança e durabilidade das estruturas de concreto atuais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o intuito de reduzir a emissão de CO₂ na atmosfera, proveniente do processo de fabricação do cimento, certos materiais, resíduos e até mesmo subprodutos começaram a ser estudados e avaliados como substitutos parciais do cimento na composição de concretos e argamassas. De acordo com NANOCEM (2016) tais materiais podem ser classificados em Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) que possuem grande potencial de substituição parcial do cimento e implantação na construção civil.

É importante validar que, certos materiais naturais, tanto na condição encontrada na natureza quanto após serem submetidos a processo de queima, e subprodutos de outros setores industriais quando colocados em solução aquosa, na presença de portlandita, formam cristais de C-S-H semelhantes aos gerados pela hidratação da fase de silicato do cimento. Logo, seu uso promove a redução dos potenciais vazios da pasta contribuindo para a proteção das armaduras do concreto (MEDEIROS, 2018). Ainda, quando são beneficiados, há a redução das chances de o CH tornar-se carbonato de cálcio, fenômeno que pode acarretar na carbonatação do concreto, reduzindo seu pH e desencadeando corrosão da armadura da estrutura.

Estes materiais podem ser provenientes de indústrias como por exemplo a cinza volante, sílica ativa, metacaulim entre outros (NEVILLE, 2016). Ainda segundo Dal Molin (2011), os MCS já são utilizados nas Centrais Dosadoras de Concreto (CDC), pois seus benefícios em questões de durabilidade já são comprovados em laboratório e em aplicação em escala real. O que contribui para o desenvolvimento sustentável da infraestrutura para uso da sociedade, pois sofrerá menos com problemas de manutenções corretivas nas edificações e obras de arte de seu uso.

Na região Sul do Brasil, está instalado um grande polo de indústrias da área cerâmica, que movimentou quantidades expressivas de materiais destinados aos revestimentos em alvenaria. Entretanto, segundo Suraneni et al. (2019) com elevadas quantidades produzidas de cerâmica, ocorre a geração de grandes porções de resíduos não aproveitáveis, sendo estes depositados em aterros e lugares impróprios.

Com o passar dos anos, os MCS vêm sendo pesquisados e utilizados nas construções para diminuir o consumo de cimento Portland, e melhorar no desempenho das estruturas executadas. Estes materiais também contribuem para o desenvolvimento da infraestrutura e mantem a integridade do meio ambiente, pois a substituição parcial do cimento Portland por MCS, ocasiona na redução de emissão do CO₂ na atmosfera.

Diante dos problemas causados pelo processamento do cimento Portland no momento de sua fabricação, pesquisas laboratoriais e ensaios envolvendo os MCS na composição de argamassas e concretos vêm sendo desenvolvidos. De acordo com estudos relacionados ao resíduo cerâmico produzido no Sul do Brasil, este possui em sua composição dióxido de silício, óxido de alumínio e ferro, e suas formas não são definidas, o que ajuda a desencadear a atividade pozolânica semelhante ao do cimento. (RAMANATHAN et al., 2019).

Entretanto, os resíduos cerâmicos necessitam de beneficiamento para aplicação como MCS. Desde forma, identificou-se a necessidade de avaliar o grau de beneficiamento necessário que resulte em um MCS com de alto desempenho sem que haja desperdício de energia nesse processamento.

1.2 OBJETIVOS

Neste item são apresentados o objetivo geral delineado para esta pesquisa e os objetivos específicos elencados para o seu alcance.

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar o uso de resíduo cerâmico em diferentes níveis de beneficiamento em substituição parcial ao cimento Portland nas propriedades da argamassa e do concreto no estado fresco e endurecido.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Investigar as propriedades químicas e físicas do resíduo cerâmico para possibilitar a construção de correlação com os estudos em argamassa e concreto;
- b) Analisar um estudo em argamassa para avaliação da influência do MCS nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido;
- c) Validar os resultados obtidos em argamassa por meio da realização de estudos em concreto;
- d) Realização de uma análise econômica e do impacto de seu uso;
- e) Investigar correlações dos resultados obtidos em argamassas e em concretos com o intuito de possibilitar o estabelecimento de uma metodologia que parta de ensaios em argamassa, com posterior confirmação em concreto para avaliação de MCS;
- f) Validar estatisticamente os resultados obtidos, a fim de possibilitar sua aplicação em futuras pesquisas e aplicações em obras correntes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Conforme Dal Molin (2011), desde os tempos antigos da sociedade, mais especificamente na Grécia antiga, o uso de materiais cimentícios suplementares era comum nas adições minerais, na qual este vem ganhando seu espaço nas construções atuais. Com o passar dos anos, a procura por estes materiais aumentou, devido às questões ambientais envolvidas no descarte incorreto destes resíduos no meio ambiente.

Conforme Mehta e Monteiro (2014) os MCS apresentam tamanho médio das partículas semelhante ao cimento Portland, que em geral, são silicosos. O cimento é formado pela junção de quatro compostos: Silicato Tricálcico ou Alita (C_3S), Silicato Dicálcico ou Belita (C_2S), aluminato tricálcico ou celita (C_3A) e Ferro Aluminato Tetracálcico ou Ferrita (C_4AF), conforme Battagin, (2011).

Diante do mencionado, os MCS possuem uma elevada quantidade de sílica vítrea, que ao reagir com o CH em meio aquoso, resulta na formação de C-S-H, muito parecido com o produzido durante as reações com cimento (NEVILLE, 1997; HOPPE FILHO, 2008; CINCOTTO, 2011). Entretanto, o CH apesar de ser benéfico para o concreto armado, mantendo protegida a armadura através da proteção catódica as barras de aço, pode se tornar um risco quando em contato com o CO_2 da atmosfera, formando Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$), reduzindo significativamente o pH do concreto, podendo afetar o aço e provocar corrosão para o mesmo (HELENE, 1993).

Defronte a tais vantagens dos MCS, sua procura vem aumentando nos últimos anos conforme já mencionado, havendo a necessidade de elaborarem novas pesquisas para a procura de novos materiais que tenham potencial na substituição do cimento, encontrando, portanto, os resíduos de indústrias, passando estes a serem chamados de subprodutos. Dentre estes, podem ser destacados a Sílica Ativa, Cinza de Casca de Arroz, a Escória de Alto Forno, a Cinza Volante e nos últimos anos o resíduo cerâmico (MEDEIROS, 2018).

De acordo com Desir et al. (2005), foram adicionados no concreto, resíduos de tijolos moídos em teores de 15% e 50%, além disso, resíduos de rochas também foram adicionados, sendo que este último não possuía atividade pozolânica. Após as análises feitas com o resíduo de tijolo moído, foram confirmadas propriedades pozolânicas que mostravam um aumento de resistência de pelo menos 15% em relação ao concreto com adição de material fino (resíduo de rocha), mas sem propriedade pozolânica.

Ainda, Oliveira, Gomes e Santos (2012), realizaram estudos com a possibilidade de inserir resíduos provenientes da cerâmica vermelha em substituição parcial do cimento, em

concretos e argamassas. O fino obtido foi caracterizado na sua densidade, finura Blaine, morfologia das partículas e microscopia eletrônica de varredura. Com os ensaios em argamassa com diferentes teores de adição entre 0% a 40%, foram caracterizados seu índice de atividade pozolânica. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão mostraram redução dessa propriedade com o aumento do teor de substituição do cimento por pó cerâmico. Com isso, os autores consideraram que os resultados apresentados tinham poder de confirmação da atividade pozolânica dos resíduos, tornando-se possível sua incorporação em argamassas e concretos.

De acordo com Malhotra e Mehta (1996), Dal Molin (2011), Mehta e Monteiro (2014), os MCS possuem três tipos de classificações, sendo materiais pozolânicos - que possuem características silicosas ou sílico-aluminosos, que quando em contato com a umidade e temperatura ambiente, desencadeiam reações químicas possibilitando a formação de produtos com propriedades cimentantes. A classe cimentante - quando colocada em quantidades de água, há a formação de produtos de hidratação. Porém suas reações são lentas e a produção de produtos de hidratação é muito baixa. Entretanto, quando posto na presença de cimento Portland, suas reações aumentam, viabilizando seu uso. E a terceira classe, que é o fíler - que não possui atividade química, apenas como melhoria na parte física do concreto, melhorando sua trabalhabilidade, diminuindo a capilaridade e permeabilidade, muito usado em concretos autoadensáveis.

Conforme Medeiros (2018), de acordo com as pesquisas realizadas envolvendo estes materiais, há uma dificuldade em criar a generalização destes comportamentos, pois tais estudos são realizados de forma regional, havendo assim uma variação no produto produzido, já que estes são de origem industrial e cada região possui sua matéria prima e método de processamento.

2.1 RESÍDUO DE TELHA CERÂMICA

Conforme Bauer (1994), a indústria da cerâmica é uma das mais antigas do mundo, devido a facilidade de encontrar a matéria prima, o barro, em grande abundância em qualquer região. Desde os tempos pré-históricos, o homem já conhecia o barro e confeccionava seus utensílios a partir do mesmo. Posteriormente, constatou que o calor tinha poder de influência no endurecimento do material, surgindo, portanto, os primeiros itens cerâmicos propriamente ditos.

Tal indústria é responsável por fornecer insumos como tijolos, telhas, tubos dentre outros materiais que possuem o barro como matéria prima. Entretanto, devido ao método de

produção destes materiais cerâmicos, há um desperdício considerável, conveniente ao método produtivo e até mesmo no momento do transporte.

Desde então, o setor vem passando por um crescente aperfeiçoamento em termos tecnológicos, gerenciais e de recursos humanos, além da criação de novos produtos cerâmicos. A tendência do crescimento de exportações, já constatada em meados dos anos 80, levou as empresas a investirem nas certificações de seus produtos em busca de níveis de qualidade internacionais (SOARES et al., 2002).

Na região sul do Brasil está instalado um expressivo polo cerâmico que movimentou entre os anos de 2010 a 2018 151.662.255 toneladas de cerâmica destinada a revestimentos e alvenaria. Este tipo de indústria gera de desperdício um valor de aproximadamente 2,5% da quantidade produzido. Sendo depositados neste período, aproximadamente 4 milhões de toneladas de resíduo cerâmico em aterros, ou locais impróprios (SURANENI et al., 2019).

Como o resíduo cerâmico gerado no sul do Brasil possui em sua composição dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro (III) em grande proporção, e suas formas cristalinas não são definidas, este material apresenta potencial de desencadear atividade pozolânica (consumo do hidróxido de cálcio residual do cimento Portland) (RAMANATHAN et al., 2019).

Entretanto, para a utilização deste material como MCS, o mesmo deverá ser beneficiado, pois a forma em que se encontra o resíduo cerâmico em sua grande parte é no formato de cacos, necessitando ser moído para a sua utilização como substituição do cimento.

Portanto, pode-se afirmar que a indústria cerâmica possui números expressivos quanto a sua larga produção, gerando empregos para a população e desenvolvendo suas respectivas regiões onde são instaladas. Porém, segundo Fonseca (2006), tais indústrias sofrem com o reaproveitamento dos resíduos gerados, tornando necessário a realização de estudos para o melhor aproveitamento de tais materiais produzidos.

2.1.1 Características físicas e químicas

Segundo Zanotto e Migliore (1991), as cerâmicas possuem uma superioridade mecânica em diversos aspectos sobre outros materiais, possuindo vantagens com relação a resistência a abrasão, inércia química e resistências a elevadas temperaturas (refratariedade), sendo, portanto, ótimos materiais para a produção de motores cerâmicos, implantes ortopédicos e ferramentas de corte. Apesar destas vantagens mencionadas, existem ainda alguns pontos

negativos na cerâmica, sendo estes a baixa resistência a impactos (pouca tenacidade), não possuem deformação plástica e apresentam fadiga estática, que leva a diminuição de sua resistência à fratura com o tempo sob aplicação de carga.

Em sua composição, as cerâmicas tradicionais são compostas por feldspato, silício e argilominerais, podendo no fim de sua produção, apresentar aditivos naturais ou sintéticos para suprir necessidades mecânicas faltantes. Normalmente, pode ser produzido materiais cerâmicos com diversos tipos de argilas, formando assim uma heterogeneidade no produto final consumido.

Na Tabela 1 a seguir, uma amostra coletada em Campos do Goytacazes no estado do Rio de Janeiro, conforme Vieira, Holanda e Pinatti (2000), mostram a composição da argila utilizada pela região para a fabricação de tijolos cerâmicos.

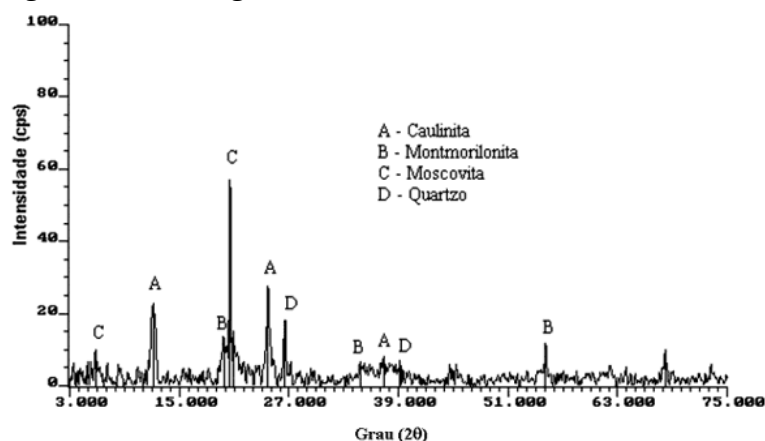
Tabela 1 – Composição química da massa cerâmica

Composição	%
SiO ₂	51,67
Al ₂ O ₃	25,78
Fe ₂ O ₃	7,81
CaO	0,13
MgO	0,59
Na ₂ O	0,39
K ₂ O	1,33
TiO ₂	1,37
PF	11,5

Fonte: Vieira, Holanda e Pinatti, 2000, n.p.

Já na Figura 2, é representado o difratograma de raio X da amostra, evidenciando a presença de moscovita que é um argilomineral.

Figura 2 – Difratograma de raio X



Fonte: Vieira, Holanda e Pinatti, 2000, n.p.

Vale ressaltar que devido a heterogeneidade das argilas, tais composições e proporções apresentadas podem variar de região para região, dificultando a caracterização destes materiais produzidos.

Pode-se considerar, conforme Fernandes (1998), que em um estudo que envolva mais de um tipo de argila, provenientes de diferentes camadas de uma jazida, é necessário a utilização de proporções diferentes dos materiais, para reduzir as variações dos resultados obtidos e buscar a melhor composição entre essas argilas, obtendo portanto a melhor característica física e química do material.

2.1.2 Atividade Pozolânica

Para a determinação da atividade Pozolânica, se faz necessário submeter o MCS em meio aquoso para que assim seja possível analisar a capacidade do material consumir o hidróxido de cálcio, semelhantes ao formado pela hidratação do cimento Portland. Entretanto, o cimento Portland não consome o hidróxido do cálcio, tornando esse um subproduto de sua hidratação, diferente do MCS, que consomem o hidróxido de cálcio, conforme Medeiros (2018).

Atualmente, existem vários métodos para a determinação da atividade pozolânica, sendo classificados em processos indiretos e diretos, que medem a resistência de argamassa e a quantidade de CaO consumido pela quantidade de MCS, respectivamente.

Os procedimentos que permitem determinar a capacidade de fixação do CaO pelos MCS são desenvolvidos desde 1937, com o pesquisador Vicat. Posteriormente, pesquisadores como Chapelle, Fratini e Luxán, Madruga e Saavedra deram continuação ao aprimoramento de tais pesquisas.

2.1.3 Métodos para a determinação da Atividade Pozolânica

Conforme dito no item 2.1.2, para a avaliação da atividade pozolânica, existem os métodos diretos e indiretos, que partem de princípios químicos e físicos, na qual esses métodos foram desenvolvidos ao longo do tempo por pesquisadores renomados como mencionado. Os efeitos gerados no concreto pelo uso de MCS são os mais variados, iniciando no estado fresco, pela alteração em suas propriedades, como na demanda de água para uma mesma trabalhabilidade, devido à flocculação das partículas sólidas da pasta.

Também ocorre no estado endurecido, pelo refinamento de poros da matriz cimentícia, através da fixação do hidróxido de cálcio residual da hidratação do cimento Portland (MEDEIROS, 2018).

Devido a grande heterogeneidade dos MCS e a particularidade dos fenômenos que acontecem durante a hidratação, ponderam a falta de métodos que consigam mensurar a atividade pozolânica de qualquer MCS, restando somente, realizar tendências para o comportamento destes materiais, conforme Rêgo (2004).

De acordo com Gava (1999), os métodos para a determinação de atividade pozolânica apresentam divergências com os efeitos reais do MCS em argamassas, devido a desconsideração dos fatores que interferem na reação pozolânica, podendo, portanto, afetar a classificação do uso desses materiais.

2.1.4 Métodos normatizados para a avaliação da influência dos MCS nas propriedades do concreto

De acordo com grandes autores e algumas normas, é possível mensurar a atividade pozolânica e o desempenho mostrado pelos materiais cimentícios suplementares, partindo de princípios físicos e químicos dos produtos. Entretanto, vale ressaltar que devido a heterogeneidade dos MCS segundo Rêgo (2004), fica muito difícil mensurar a atividade pozolânica com certo grau de confiabilidade, podendo apontar então, somente tendências em seu comportamento. Portanto, neste capítulo, serão abordadas as normas vigentes aos métodos empregados e breve descrição dos procedimentos dos ensaios realizados.

2.1.4.1 Índice de Atividade Pozolânica com o Cimento Portland

Este método de ensaio é para estabelecer o índice de atividade pozolânica, e é regido pela NBR 5752 (ABNT, 2014), na qual sua versão mais atual é do ano de 2014. Para a realização, é necessário a comparação de duas argamassas produzidas, uma contendo apenas cimento Portland (A) e a outra com substituição parcial do cimento pelo MCS em estudo (B). Estas argamassas devem apresentar um índice de consistência (IC) de $225 \pm 5\text{mm}$, entretanto, caso a argamassa B apresente valores diferentes do mencionado, ou seja, uma diferença entorno de $\pm 10\text{mm}$, deve haver sua regularização. De acordo com a NBR 5752 de 1992, tal regularização deve ser feita com água, porém, com sua atualização no ano de 2014, seu IC deve

ser controlado a partir de aditivos superplastificantes, levando a resultados questionáveis, pois os aditivos promovem a dispersão dos grãos de cimento e MCS.

Quanto ao estado endurecido das argamassas, sua cura deve ser realizada em câmara úmida nas primeiras 24 horas com uma temperatura por volta de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, feito isso, os corpos de prova (CP) devem ser colocados em tanques com água saturada com cal, havendo a necessidade de troca a cada 15 dias.

O cálculo do índice de atividade pozolânica do cimento Portland é representado pela Equação 1 a seguir:

Equação 1 - Cálculo do índice de atividade pozolânica do cimento Portland

$$IAP = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad \text{Equação (1.1)}$$

Onde:

IAP = Índice de Atividade Pozolânica, expresso em porcentagem;

f_{cB} = resistência média final da argamassa B, expresso em MPa;

f_{cA} = resistência média final da argamassa A, expresso em MPa.

Por fim, para sua caracterização, os corpos de prova contendo MCS precisam apresentar 90% da resistência média em relação a argamassa A, com isso, o MCS pode ser caracterizado como material pozolânico.

2.1.4.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cal

Para a determinação do índice de atividade pozolânica com cal, deve-se respeitar a NBR 5751 (ABNT, 2015), na qual este é um método classificado como indireto, onde determina a atividade pozolânica através do hidróxido de cálcio (CaOH_2). Seus resultados avaliam a resistência de compressão das argamassas sem a presença de cimento, apenas com o material pozolânico estudado e com CaOH_2 .

O ensaio consiste em moldar três corpos de prova com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, contendo a argamassa a ser avaliada, esta compreendendo uma parte de hidróxido de cálcio P.A e o dobro do MCS avaliado. O índice de consistência deve-se comportar na faixa de $225 \pm 5\text{mm}$, logo, a quantidade de água deve atender a esse requisito. A massa de material pozolânico deve ser calculada conforme a Equação 2.

Equação 2 - Determinação da massa de material pozolânico para o traço

$$2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot 104 \quad \text{Equação (1.2)}$$

Onde:

δ_{poz} : Massa específica da pozolana, expressa em g/cm³;

δ_{cal} : Massa específica da cal, expressa em g/cm³.

Quanto a cura das argamassas, nas primeiras 24 horas, os CPs devem ser mantidos em ambientes com temperatura controlada, na faixa de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, posteriormente, submetidos a uma cura em estufa com temperatura de $55 \pm 2^\circ\text{C}$ pelos próximos seis dias, concluindo assim a fase de cura, podendo realizar os ensaios de compressão axial. O resultado da atividade pozolânica é a média aritmética entre os três corpos de prova, com um desvio relativo inferior a 6%.

2.1.4.3 Chapelle Modificado

Este método é preconizado pela NBR 15895 (ABNT, 2010). Este método busca como resultado avaliar o índice de atividade pozolânica através da determinação do hidróxido de cálcio fixado. De início, é pesado cerca de 1.0g de material pozolânico, 2.0g de óxido de cálcio (CaO) e 250ml de água isenta de gás carbônico (CO₂).

Feito isso, transferir os materiais pesados para um frasco do tipo Erlenmeyer, com um volume de 500ml, logo após, adicionar a água medida em balão volumétrico. A mistura deve ser colocada em banho-maria para agitação em temperatura controlada, por volta de $90 \pm 5^\circ\text{C}$, essa etapa deve ser concluída após 16 horas de ensaio.

Adicionar cerca de 250 ml de uma solução a base de sacarose, agitar mecanicamente ou manualmente por 15 minutos para cessar a reação pozolânica. O resultado deste ensaio é determinado pela Equação 3.

Equação 3 - Determinação do Hidróxido de Cálcio fixado

$$ICa(OH)_2 = \frac{28 \cdot (V3 - V2) \cdot FC}{m2 \cdot 1,32} \quad \text{Equação (1.3)}$$

Onde:

$ICa(OH)_2$ = índice de atividade pozolânica, em mg de CaO/g de material;

V3 = volume necessário para titulação da solução com material pozolânico, expresso em ml;

V2 = volume necessário para titulação da solução padrão, expresso em ml;

Fc = fator de correção do HCl;

m2 = massa do material pozolânico, expresso em g.

Pelo método de Chapelle modificado, para ser classificado como pozolânico, o material deve apresentar capacidade de fixar mais de 330 miligramas de CaO por grama de pozolana (mgCaO/g). Utilizando a relação molecular de $Ca(OH)_2/CaO$ de 1,32, este valor passa a ser 435,6 $Ca(OH)_2$ (MEDEIROS, 2018).

2.2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Como observado, os métodos atuais existentes são eficazes para avaliar o comportamento dos MCS em concretos no seu estado endurecido, especificamente para mensurar a capacidade de fixação da portlandita, de acordo com Medeiros (2018), na qual estes ensaios combinam apenas os MCS com o cimento.

Entretanto, poucos estudos e pesquisas foram realizadas no quesito de análises da influência dos MCS nas propriedades do concreto fresco, deixando a desejar com o dia a dia de centrais dosadoras que necessitam de tais conhecimentos científicos para melhorarem seus processos de produção de concreto. Além disso, deve-se apurar o comportamento dos MCS reativos nas propriedades frescas do concreto, pois o mesmo pode afetar tais propriedades de forma direta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento desta pesquisa e suas características. Destaca-se, ainda, o programa experimental utilizado e as variáveis investigadas.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CP V – ARI, cuja escolha se deu devido a sua pureza, sem adições de materiais que possam reagir com o MCS a ser estudado, a seguir, as tabelas 2 e 3 mostram as características químicas e físicas do cimento empregado nesta pesquisa

Tabela 2 – Composição química

Data	Químicos						Perda Fogo	CaO Livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal.
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃				
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4	4,37	18,92	2,85	62,80	2,73	2,74	3,94	1,29	0,99	0,70
6	4,26	18,98	2,69	63,14	2,65	2,68	3,83	1,43	0,80	0,68
8	4,24	19,03	2,65	63,84	2,41	2,73	3,84	1,60	0,69	0,68
12	4,34	18,61	2,78	61,71	3,35	2,77	3,80	1,99	0,76	0,64
14	4,39	18,92	2,92	61,22	4,30	2,63	3,63	1,93	0,60	0,67
18	4,38	19,12	2,85	61,92	4,16	2,69	3,86	1,96	0,83	0,69
20	4,49	19,39	2,92	61,00	4,09	2,64	3,75	1,15	0,77	0,62
22	4,53	19,08	3,07	61,16	4,00	2,67	3,53	0,95	0,72	0,61
26	4,42	18,77	3,22	61,62	3,62	2,69	3,89	1,71	0,69	0,69
28	4,45	19,31	2,84	60,81	4,17	2,70	3,74	1,88	0,96	0,64
Média	4,39	19,01	2,88	61,92	3,55	2,69	3,78	1,59	0,78	0,66
Sd	0,09	0,23	0,17	1,01	0,72	0,04	0,12	0,37	0,12	0,03
Min	4,24	18,61	2,65	60,81	2,41	2,63	3,53	0,95	0,60	0,61
Max	4,53	19,39	3,22	63,84	4,30	2,77	3,94	1,99	0,99	0,70

Fonte: Itambé Cimentos (2021).

Tabela 3 – Características físicas

Data	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Físicos			Resistência à Compressão			
		Início	Fim		Blaine	# 200	# 325	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
mm	min	min	%	cm²/g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa	
4	0,50	210	270	30,40	4.380	0,01	0,20	23,7	38,9	43,6	53,1
6	0,50	170	240	28,90	4.340	0,20	1,50	23,2	38,1	43,8	53,9
8	0,00	160	225	28,40	4.350	0,30	1,90	22,9	37,0	43,9	53,5
12	0,00	160	210	29,10	4.400	0,20	1,60	24,0	37,5	44,0	51,0
14	0,00	180	240	28,60	4.360	0,09	0,50	23,6	37,6	44,0	51,3
18	0,00	190	255	29,00	4.370	0,05	0,40	23,3	37,4	45,0	—
20	1,00	185	240	29,30	4.450	0,06	0,30	23,1	38,2	45,4	—
22	0,50	180	240	29,90	4.350	0,05	0,30	24,0	38,4	45,4	—
26	1,00	195	255	29,60	4.450	0,10	0,80	23,4	36,6	43,7	—
28	0,00	180	240	29,80	4.410	0,02	0,30	23,5	39,0	44,3	—
Média	0,35	181	242	29,3	4.386	0,11	0,78	23,5	37,9	44,3	52,6
Sd	0,41	15	17	0,6	40	0,09	0,64	0,4	0,8	0,7	1,3
Min	0,00	160	210	28,4	4.340	0,01	0,20	22,9	36,6	43,6	51,0
Max	1,00	210	270	30,4	4.450	0,30	1,90	24,0	39,0	45,4	53,9

Fonte: Itambé Cimentos (2021).

As características físicas e químicas devem estar de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), a qual, para esta pesquisa, este requisito foi atendido.

3.1.2 Água

A água utilizada é proveniente da cidade de Tubarão, fornecida pela Tubarão Saneamento S.A.

3.1.3 Aditivo

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado o aditivo superplastificante para concreto com alto poder de redução de água e com aplicações múltiplas e isento de cloretos, tec-flow 8000. Suas características serão apresentadas a seguir, de acordo com a tabela 4.

Tabela 4 – Características do aditivo

Propriedades	Especificação	Unidade
Coloração	Alaranjado	-
Massa Específica	1,080 - 1,120	g/cm ³
Dosag. Recomend.	0,3 a 2,0	%

Fonte: Gcp applied Technologies (2021)

As características devem atender a NBR 11768-1 (ABNT, 2019), a qual, para esta pesquisa, este requisito foi atendido.

3.1.4 Agregados

Os agregados utilizados para o desenvolvimento dos traços propostos, apresentam as seguintes características físicas, de acordo com a tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Características dos agregados empregados

Propriedades	Und.	Brita 19mm	Brita 0	A. de Britagem	A. Média Grossa	A. Média Fina	A. Fina
Módulo de Finura	-	6,92	5,98	3,11	2,92	2,53	1,63
Dimensão Máxima	mm	19,10	9,52	4,75	1,16	0,92	0,60
Massa Unitária em Estado Solto	kg/m ³	1383	1368	1575	1563	1558	1532
Teor de Material Pulverulento	%	0,50	0,30	9,30	0,80	0,40	0,50
Impurezas Orgânicas e Húmicas	ppm	< 300	< 300	< 300	< 300	< 300	< 300
Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis	%	-	-	0,40	-	-	-
Massa Específica Aparente	g/cm ³	2,60	2,54	2,63	2,63	2,66	2,65
Absorção	%	1,10	1,60	0,40	0,35	0,26	0,21

Fonte: Autores (2021).

As características físicas dos agregados, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), foram atendidas para o desenvolvimento desta pesquisa.

3.1.5 Material Cimentício Suplementar

O material escolhido é proveniente do município de Sangão/SC. É composto por resíduos de telhas cerâmicas brancas, dos quais foram moídos finamente para utilização junto ao cimento. A escolha do material se deu devido a sua disponibilidade na região.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO ESTUDO REALIZADO

A fim de solucionar a hipótese do estudo, optou-se por utilizar o método de procedimento experimental, com alteração de variáveis e análise estatística dos resultados obtidos. A pesquisa em questão, devido a necessidade de verificar e interpretar hipóteses, foi explicativa.

Segundo Gil (2008), o método consiste em submeter o objeto em estudo sob influência de variáveis específicas, em condições controladas e conhecidas pelo investigador, para analisar as reações que determinada variável produz no material em estudo.

É de suma importância a verificação dos instrumentos de coleta de dados, submetendo-os a testes para garantir sua eficiência para proporcionar os resultados que a pesquisa busca medir, assim como afirma Gerhardt et al. (2009). O método de pesquisa proposto pode ser realizado em laboratório, onde a situação de campo é criada artificialmente, ou no campo, onde as condições de manipulação já estão dispostas.

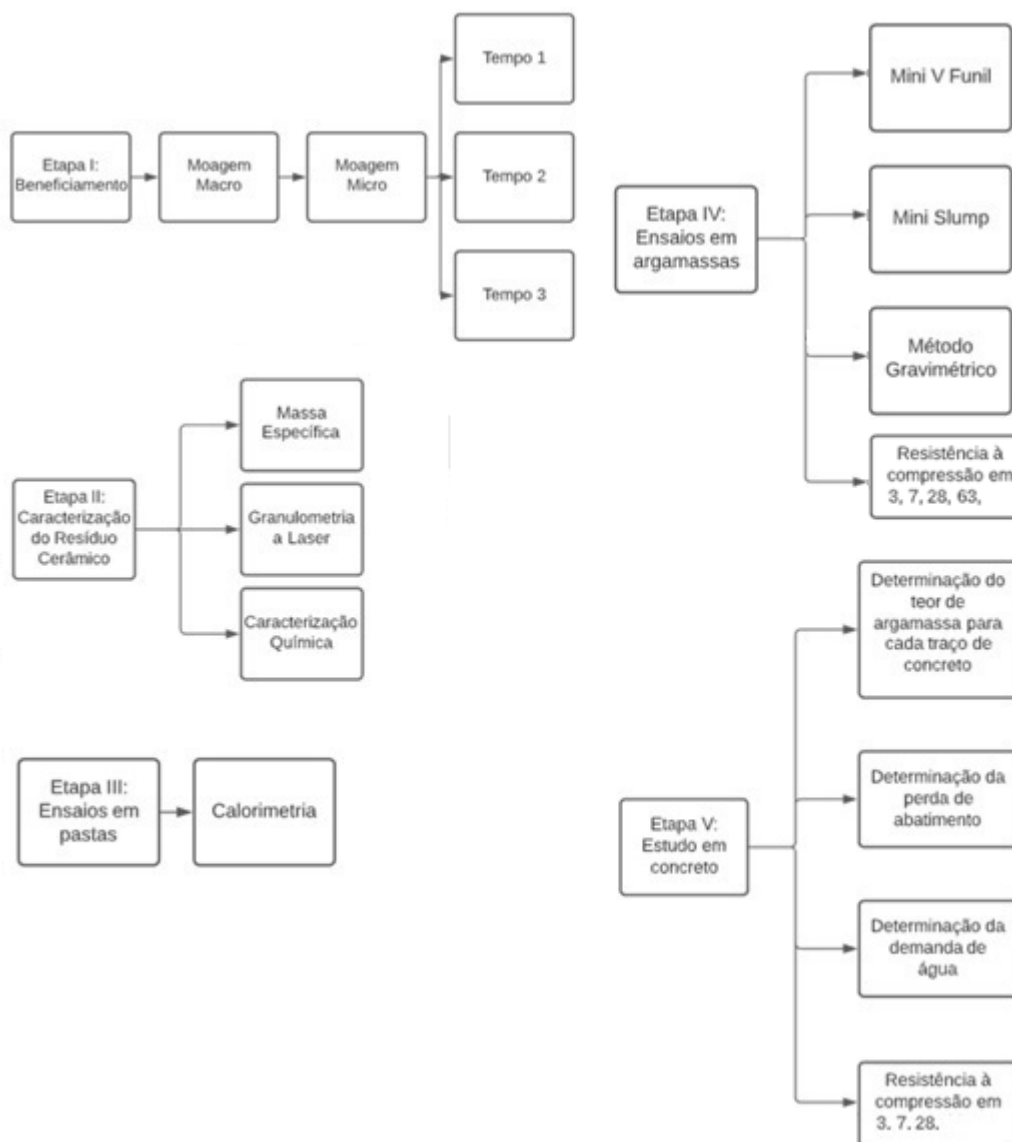
Com a utilização do método experimental, foi possível obter o controle e resultados desejados pelos investigadores. O tratamento das variáveis, foi constituído pela adição de diferentes quantidades de resíduo de telha cerâmica ao cimento Portland. A matéria prima classificada como variável independente do estudo, foi a quantidade de cimento Portland utilizado nos dados amostrais.

3.3 MÉTODOS

Essa etapa da pesquisa tem o objetivo classificar o grau de moagem que apresentou melhores resultados do ponto de vista de sua atividade pozolânica; analisar as propriedades físicas e químicas dos resíduos de telha cerâmica provenientes da Cidade de Sangão/SC; e de acordo com os resultados idealizar curvas de dosagem no concreto com diferentes teores de resíduo cerâmico conforme os parâmetros técnicos estabelecidos.

A seguir está apresentado o organograma contendo as etapas do procedimento que proporcionaram os resultados obtidos.

Figura 3 – Organograma experimental da pesquisa



Fonte: Autores (2020).

A primeira etapa consiste em realizar o beneficiamento do material, a fim de caracterizar a atividade pozolânica dos resíduos cerâmicos pelos métodos consagrados. A moagem foi realizada por um moinho de bolas, atingindo 95% de sua finura passante na peneira de 45 μm .

Durante a segunda etapa foi executada a determinação química do material por espectroscopia por fluorescência de raio X, obtendo a contagem quantitativa e qualitativa dos elementos químicos presentes na amostra e a caracterização física dos elementos foi realizada pelo ensaio de difração de raios laser. Além disso, realizou-se os ensaios de massa específica do resíduo cerâmico, pelo método do frasco de Le Chatelier.

A terceira etapa foi destinada a caracterizar e avaliar a influência da substituição do cimento pelo resíduo de telha cerâmica na curva de calor, utilizando um calorímetro semi-adiabático, seguindo as diretrizes da NBR 12006 (ABNT,1990).

Na quarta etapa foram executados os ensaios em argamassa, utilizando o traço da tabela 7, no qual foi avaliado suas propriedades no estado fresco, através dos ensaios de mini V funil, mini slump e o método gravimétrico, determinando sua viscosidade, fluidez e densidade real respectivamente. Além disso, analisou-se a demanda de água para cada traço de argamassa e a resistência à compressão da argamassa nas idades de 3, 7, 28 e 63 dias, afim de comparar os resultados obtidos em concreto.

E por último, durante a quinta etapa foram realizados os testes em concreto com diferentes teores de resíduo de telha cerâmica em substituição ao cimento. Verificou-se o teor de argamassa ideal para a realização dos ensaios, análise do abatimento do concreto e a determinação da quantidade de água para cada traço de concreto. A determinação da resistência à compressão foi obtida por uma prensa central com as idades de 3, 7 e 28 dias.

3.3.1 Determinação do grau de moagem

A determinação do grau de moagem do resíduo cerâmico foi obtida por granulometria, caracterizado pelo tempo decorrido em que o material permanece no moinho de bolas, e sendo totalmente passante pela peneira 0,045mm. A seguir, imagem do equipamento utilizado para a realização do beneficiamento do material.

Figura 4 – Moinho de bolas utilizado no processo de beneficiamento



Fonte: Autores (2021)

Para que o material obtido fosse ideal para a realização dos ensaios em argamassa e concreto, utilizou-se os tempos de 10, 20 e 30min de moagem para que a granulometria enquadrasse nos perfis desta pesquisa.

3.3.2 Ensaio de massa específica

Para a determinação da massa específica do material utilizado para substituição do cimento, efetuou-se o ensaio de Le Chatelier, preconizado pela NBR 11513 (ABNT, 2016), no qual, consiste no preenchimento do frasco padronizado pela norma com o MCS em análise, verificando o volume ocupado pelo material colocado no recipiente, sendo necessário conhecer a massa de tal material utilizado.

3.3.3 Determinação das características físicas

A determinação da composição física do resíduo cerâmico foi obtida por eflorescência de raios laser, apresentando o diâmetro médio dos grãos, 10%, 50% e 90%. O material de estudo deverá seguir as diretrizes da NBR 12653 (ABNT, 2014), que normatiza os parâmetros físicos dos materiais pozolânicos.

3.3.4 Determinação da composição química

A determinação da composição química do resíduo cerâmico foi obtida pelo ensaio de difração de Raios-X, apresentando as características químicas do material, onde o mesmo deverá seguir as diretrizes da NBR 12653 (ABNT, 2014), que normatiza os parâmetros dos materiais pozolânicos.

3.3.5 Ensaios em pasta

Afim de determinar a curva de calor para analisar a influência dos teores de substituição por resíduo cerâmico beneficiado, realizou-se o ensaio de calorimetria em um calorímetro semi-adiabático, preconizado pela NBR 12006 (ABNT, 1990). Neste ensaio, realizou-se o preenchimento dos moldes com os traços analisados nesta pesquisa, verificando o acréscimo de temperatura, no qual, esta é utilizada para obter a quantidade de calor produzida pelas reações do cimento, conforme afirma Souza (2007).

3.3.6 Estudo em argamassa

Os ensaios realizados em argamassa têm como finalidade a determinação da consistência, na qual foram realizados os ensaios do mini funil V, preconizado pela NBR 15823-5 (ABNT, 2017) para determinar a sua viscosidade, na qual preenche-se o funil V com uma massa de concreto e mede-se o tempo de escoamento da mesma. Ainda, para a determinação da fluidez e da densidade real da argamassa, foram realizados os ensaios do mini slump e o método gravimétrico, regidos respectivamente pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) e NBR 13278 (ABNT, 2005). De acordo com a NBR NM 67 adaptada por Martins (2018) para o uso em argamassas sem agregado graúdo, é moldado o cone de slump com três camadas de 12 golpes cada. Seguindo a NBR 13278, é realizado o preenchimento do molde de PVC calibrado com argamassa, divide-se em três camadas e aplica-se 20 golpes em cada, feito isso anotar a massa do recipiente com a argamassa. Após a realização destes ensaios, foram utilizadas as argamassas que apresentaram os melhores resultados no estado fresco e endurecido.

A tabela 6 apresenta os traços utilizados por Medeiros para a substituição parcial do cimento pelo resíduo analisado.

Tabela 6 – Traços unitários em volume absoluto das argamassas

Teor de substituição	Cimento	Cinza Volante	Grossa	Areia			a/ag	Aditivo
				Média Grossa	Média Fina	Fina		
Referência	1,00	0,00	0,625	0,625	0,625	0,625	0,40	0,30%
10%	0,93	0,07	0,625	0,625	0,625	0,625	0,41	0,31%
20%	0,85	0,15	0,625	0,625	0,625	0,625	0,42	0,32%
30%	0,77	0,23	0,625	0,625	0,625	0,625	0,44	0,34%
35%	0,73	0,27	0,625	0,625	0,625	0,625	0,45	0,34%

Fonte: Medeiros (2018)

A tabela 7, apresenta os traços utilizados para a substituição parcial do cimento pelo MCS proveniente da telha cerâmica branca.

Tabela 7 – Traços unitários utilizados na produção das argamassas

Teor de substituição	Cimento	Resíduo Cerâmico	Média Grossa	Areias		a/c	Aditivo
				Média Fina	Fina		
Referência	0,80	0	0,750	0,650	0,750	0,38	1,00%
10%	0,72	0,08	0,750	0,650	0,750	0,45	1,50%
20%	0,64	0,16	0,750	0,650	0,750	0,5	1,75%
30%	0,56	0,24	0,750	0,650	0,750	0,51	1,75%
35%	0,52	0,28	0,750	0,650	0,750	0,58	2,00%

Fonte: Autores (2021)

Para o estado endurecido das argamassas, analisou-se a capacidade de resistência a compressão dos corpos de prova, moldados para cada traço. O ensaio de compressão axial, preconizado pela NBR 5739 (ABNT, 2007), foi realizado para as idades de 3, 7, 28 e 63 dias.

3.3.7 Estudo em concreto

A partir dos resultados obtidos em argamassa, foi possível determinar os traços com os resíduos cerâmicos com maior capacidade de aplicação. Entretanto, devido a pandemia enfrentada no ano da pesquisa, não foi possível realizar os ensaios nos demais traços, apenas para um traço médio 1:5. Para isso, foram avaliados os teores de argamassa ideal para os traços desenvolvidos para esta pesquisa. Como referência, utilizou-se o traço médio rico desenvolvido por Medeiros, conforme a tabela 8, porém com a utilização de brita 0 para a produção do concreto.

Tabela 8 – Proporcionamento dos materiais para confecção de 1 m³ de concreto.

Teor de substituição	Cimento	MCS	Areias		Brita 19mm	Água inicial	Água final	Aditivo
			Fina	Britagem				
Referência	403,50	0,00	386,40	386,40	1043,10	177,60	180,60	1,61

Fonte: Medeiros (2018)

Para a produção do concreto, foram utilizados duas areias, areia de britagem e uma areia fina. A tabela 9 apresenta o proporcionamento dos materiais para produção do concreto da pesquisa.

Tabela 9 – Proporcionamento dos materiais para produção de 12L do concreto da pesquisa.

Teor de substituição	Cimento	MCS	Areias		Brita 19mm	Brita 0	a/c	Aditivo
			Fina	Britagem				
Referência	4,80	0,00	6,00	5,04	6,48	6,48	0,46	0,40%
10%	4,32	0,48	6,00	5,04	6,48	6,48	0,48	0,40%
30%	3,36	1,44	6,00	5,04	6,48	6,48	0,62	0,55%

Fonte: Autores (2021)

Como pode ser observado na tabela anterior, fora necessário a correção na relação a/c de todos os traços de concreto, com o intuito de manter o abatimento mais próximo do obtido pelo traço referência.

3.3.7.1 Determinação do teor de argamassa ideal

Além disso, utilizou-se a lei de Inge Lyse para auxiliar a determinar o teor de argamassa ideal, para o traço médio proposto. A equação de Lyse propõe uma relação entre

água e materiais secos, no qual este cálculo está para a quantidade de 1kg de cimento. A seguir, a equação de Lyse utilizada para auxiliar na determinação do teor de argamassa, utilizado nesta pesquisa.

Equação 4 - Determinação do teor de argamassa para a produção de concreto

$$\alpha = \frac{1+a}{1+m} \times 100 \quad \text{Equação (1.4)}$$

Onde:

α : Teor de argamassa, expresso em %.

a: Massa de areia, expressa em kg.

m: somatório das massas de areia e brita, expresso em kg.

3.3.7.2 Determinação da perda de abatimento

Após encontrar o teor de argamassa ideal, realizou-se a determinação da perda de abatimento, na qual colocava-se a betoneira em posição horizontal simulando a chegada do caminhão betoneira na rotação baixa, este procedimento era realizado por 15 minutos.

3.3.7.3 Determinação da demanda de água

A fim de manter o slump e a trabalhabilidade obtida pelo traço referência do concreto, houve a necessidade de correção da relação água/ cimento (a/c), devendo ser adicionada quantidades de água durante o processo de mistura dos materiais.

3.3.7.4 Determinação da resistência à compressão axial

Para a determinação da resistência à compressão do concreto, foram moldados três corpos de prova dos melhores teores encontrados em argamassa no estudo em estado fresco, na qual suas dimensões são de 10cm x 20cm e moldados em 2 camadas de 12 golpes cada. O ensaio foi realizado nas idades de 3, 7 e 28 dias. Além disso, realizou-se o ensaio de compressão nas argamassas utilizadas no estado fresco, afim de validar os resultados obtidos em concreto. O ensaio realizado verificou as idades de 3, 7, 28 e 63 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo a seguir tem por objetivo retratar os resultados alcançados com os métodos de ensaio realizados, debatendo sobre as características específicas observadas da adição do MCS utilizado, e a viabilidade do uso do resíduo de telha cerâmica em substituição parcial do cimento.

4.1 DETERMINAÇÃO DO GRAU DE MOAGEM

A determinação do grau de moagem consiste no tempo de moagem em que o material permaneceu no moinho de bolas, considerando que o resíduo seja totalmente passante na peneira 0,075 mm. A figura 5 a seguir apresenta o resultado obtido após o tempo de 10 e 20 minutos.

Figura 5 – Material retido na peneira



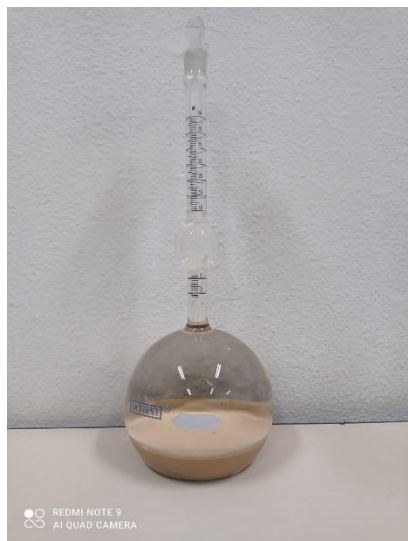
Fonte: Autores (2021)

Além do uso do moinho de bolas, o material também foi peneirado manualmente e passado na peneira 0,045 mm. O primeiro teste iniciou com 10 minutos de moagem, acrescentando-se tempo até o MCS passar totalmente na peneira 0,075 mm, com cerca de 30 minutos de moagem.

4.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

Conforme descrito no item 3.3.2, para a determinação da massa específica do material, utilizou-se o ensaio de Le Chatelier, normatizado pela NBR 11513 (ABNT, 2016), conforme mostra a imagem a seguir

Figura 6 – Ensaio do frasco de Le Chatelier



Fonte: Autores (2021)

De início, pesou-se a massa de material para a realização do ensaio, obtendo 45,6g. Em seguida, anotou-se a primeira leitura do frasco, que posteriormente, realizou-se as demais etapas do ensaio até verificar a última leitura, que se compreende em 18,8cm³. Com isso, a massa específica do resíduo cerâmico estudado, alcançou o valor de 2,56g/cm³. A seguir, imagem referente ao ensaio realizado para a determinação da massa específica.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Os resultados obtidos por difração de raios laser para determinação dos diâmetros das partículas estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Características físicas do resíduo cerâmico

Características físicas	
Diâmetro médio dos grãos	Dimensões
Diâmetro a 10%	2,68 µm
Diâmetro a 50%	22,49 µm
Diâmetro a 90%	59,81 µm
Diâmetro médio	27,72 µm

Fonte: Autores (2021)

O material utilizado no desenvolvimento desta pesquisa, se enquadra nos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014), no qual, o material deve apresentar uma granulometria fina, tendo seu percentual retido na peneira 45µm menor que 20% do total, buscando o preenchimento dos vazios e proporcionando uma melhora na resistência final. A característica física e a atividade pozolânica serão beneficiadas se o material seguir tais recomendações.

4.4 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A determinação química do MCS obteve os seguintes resultados de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11 – Composição química do resíduo cerâmico beneficiado

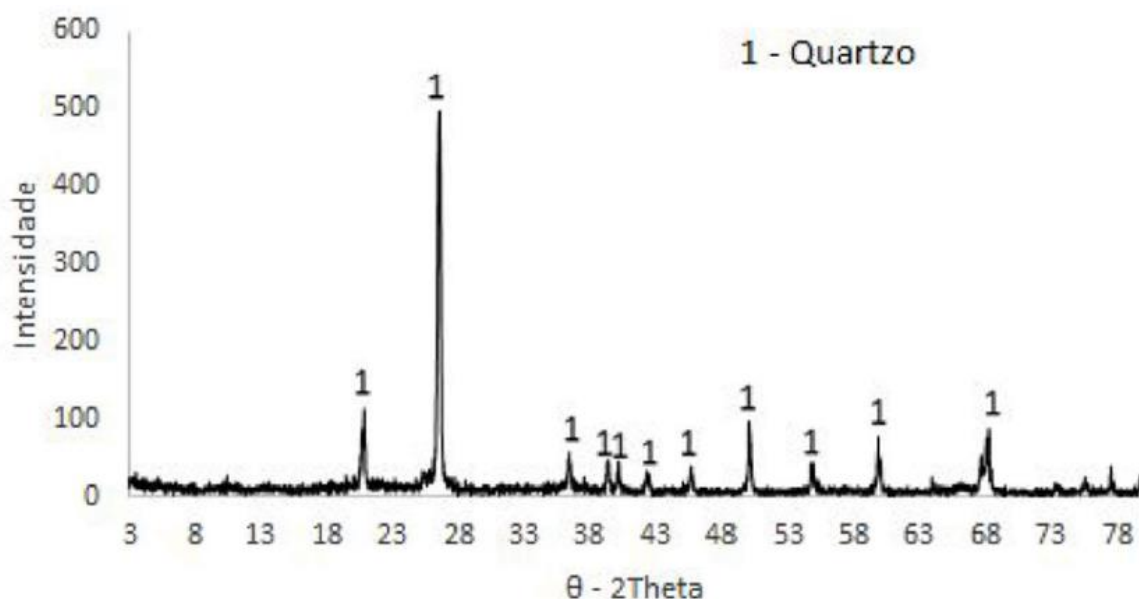
Composição Química	
Componentes	MCS
Al_2O_3	21,04
CaO	1,79
Fe_2O_3	1,70
K_2O	2,53
MgO	1,21
MnO	<0,05
Na_2O	3,30
P_2O_5	0,11
SiO_2	66,35
TiO_2	0,77
B_2O_3	-
Li_2O	-
BaO	0,12
Co_2O_3	<0,1
Cr_2O_3	<0,1
PbO	<0,1
SrO	<0,1
ZnO	<0,1
$ZrO_2 + HfO_2$	0,46
<i>Perda ao fogo</i>	0,50

Fonte: Autores (2021)

Diante da tabela 11, observa-se a existência de Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , sendo estes os responsáveis pela fixação de CaO , gerando as reações pozolânicas, conforme Medeiros (2018).

A Figura 7 demonstra os resultados obtidos por meio do ensaio de fluorescência de Raios-x:

Figura 7 – Diagrama de fluorescência de Raio - X



Fonte: Autores (2021)

De acordo com o ensaio, o resíduo cerâmico apresenta em sua composição química mais de 85% de sílica e alumina. Assim como foi apresentado no item 2.1, esses componentes apresentam potencial de desencadear atividade pozolânica.

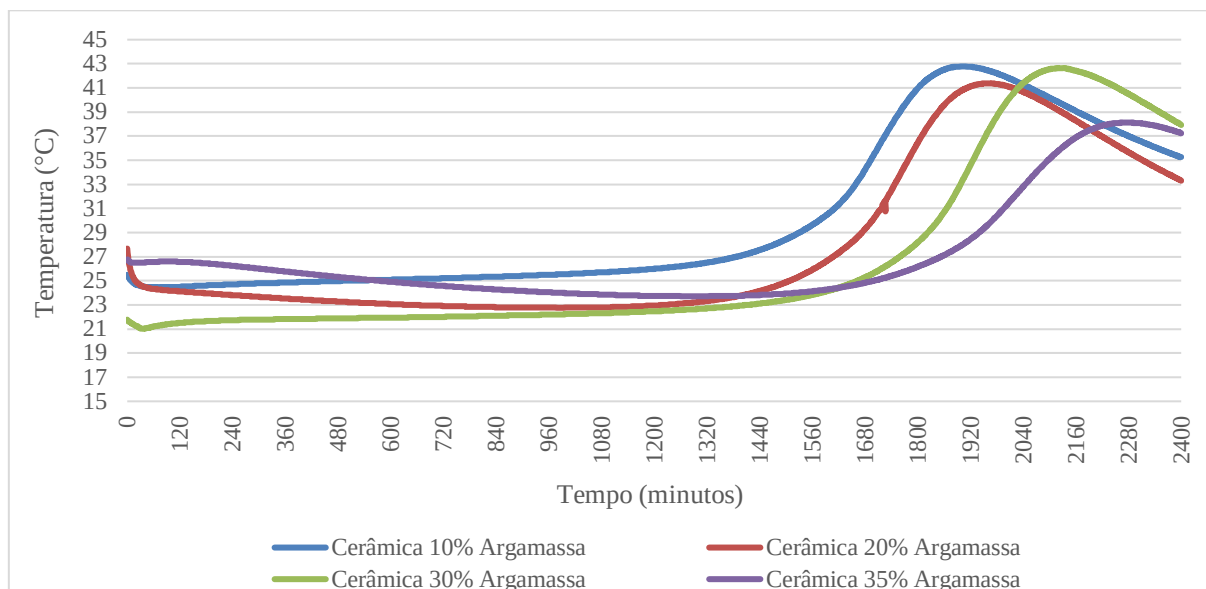
4.5 ENSAIOS EM PASTA

Para os ensaios em pasta, foram analisados todos os teores de substituição em concreto e argamassa produzidos para esta pesquisa, no qual, manteve-se as quantidades de cimento e aditivos para a realização do ensaio.

De acordo com Souza (2007), a calorimetria semi-adiabática mensura o acréscimo de temperatura proveniente das reações que acontecem no interior da pasta. Este ensaio busca mostrar o início e fim de pega da mistura, conforme Neville (2013), o início de pega é o ponto correspondente ao final do período de indução, quando ocorre uma acentuada elevação de temperatura, e o fim de pega, compreende-se ao pico de temperatura liberada durante o processo de hidratação do cimento.

A seguir, a figura 8 mostra o início e fim da pega dos traços analisados para argamassa.

Figura 8 – Curva de evolução de calor, método calorímetro semi-adiabático, análise dos teores em argamassa.

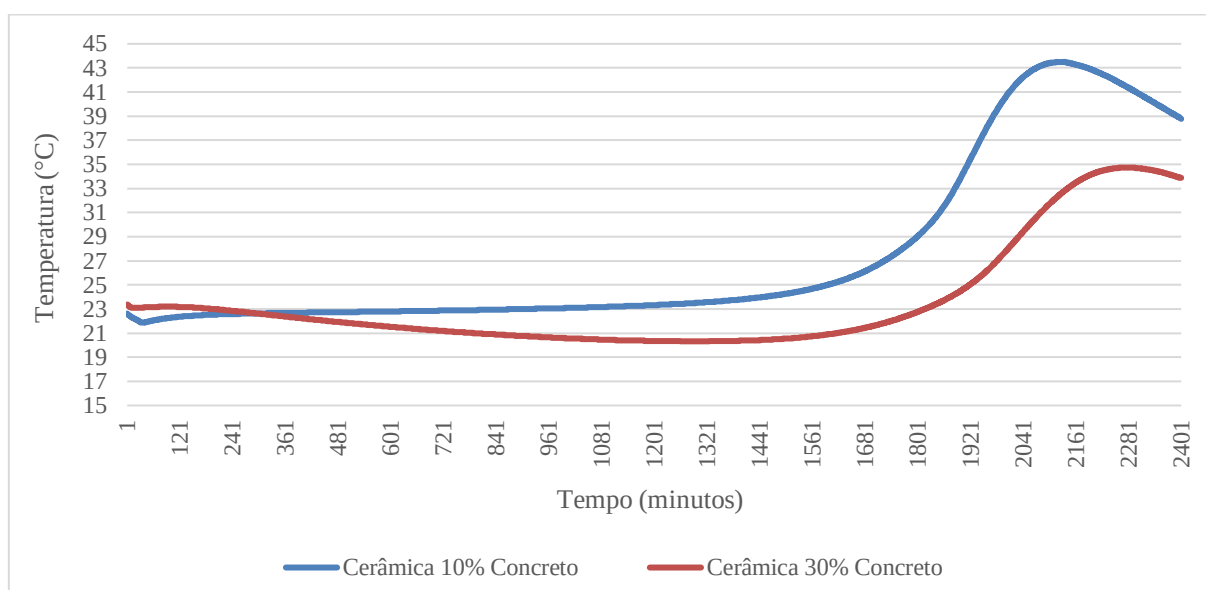


Fonte: Autores (2021)

É possível verificar que para os maiores teores de substituição, menor será o calor liberado na reação, e também, o início de pega para os menores de substituição, se da mais rápido, devido a maior quantidade de cimento na pasta.

A seguir, a figura 9 mostra o início e fim da pega dos traços analisados para concreto.

Figura 9 – Curva de evolução de calor, método calorímetro semi-adiabático, análise dos teores em concreto.



Fonte: Autores (2021)

As figuras 8 e 9 evidenciam a curva de evolução de calor para os teores estudados, sendo possível analisar o início de pega antecipado para as amostras com teores de substituição menores, e uma liberação de calor maior para tais teores, tanto para argamassa quanto para concreto.

4.6 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.6.1 Ensaios em argamassa

Seguindo as diretrizes da NBR 16541 (ABNT, 2016) que trata sobre o estudo e preparo da mistura da argamassa, foi analisada a utilização da substituição parcial do MCS na mistura de argamassa no estado fresco. A seguir, da esquerda para a direita, as imagens dos ensaios espalhamento e método gravimétrico, realizados para esta pesquisa.

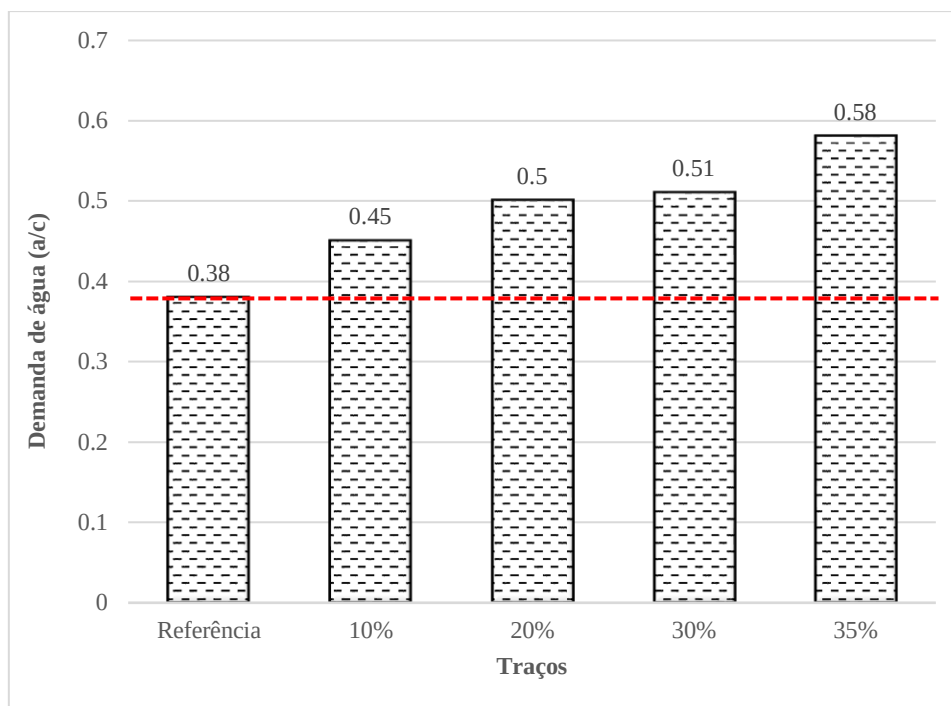
Figura 10 – Espalhamento Estático e Método Gravimétrico



Fonte: Autores (2021)

A figura 11 apresenta os resultados da demanda de água por traço de argamassa, verificando o mesmo fenômeno que ocorre nos demais ensaios, uma necessidade no aumento da relação a/c para que haja uma melhora na trabalhabilidade da argamassa.

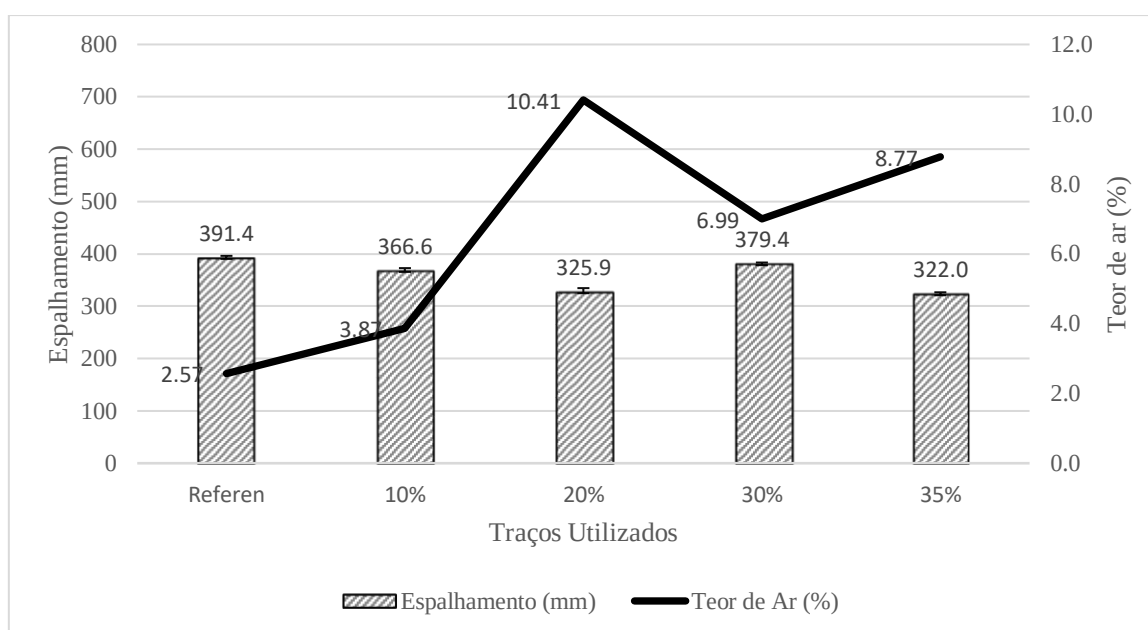
Figura 11 – Demanda de água por traço de argamassa



Fonte: Autores (2021)

O primeiro ensaio realizado foi o mini V funil, de acordo com a NBR 15823-5 (ABNT, 2010), como foi explicado no item 3.3.6. Após o ensaio do funil, foi realizado o ensaio do mini slump, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), seguido do ensaio de espalhamento estático (flow 0), segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016). Os resultados podem ser observados no gráfico da Figura 12.

Figura 12 – Gráfico de Espalhamento e Teor de Ar Incorporado

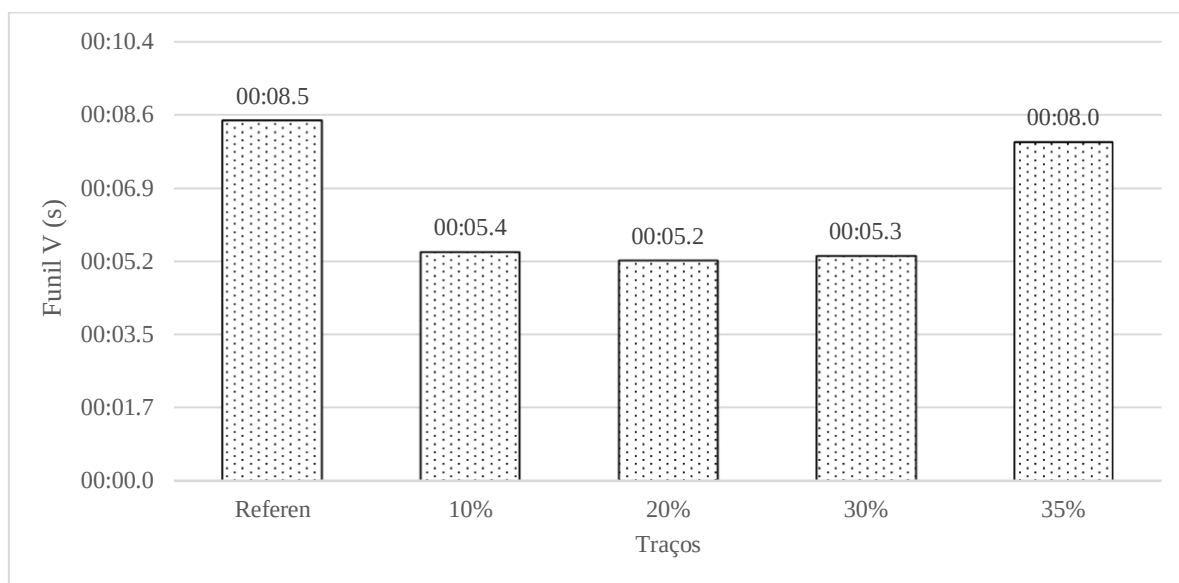


Fonte: Autores (2021)

Diante do resultado apresentado, observa-se a perda de espalhamento da argamassa pelo ensaio do mini slump e o aumento do teor de ar incorporado. Isso se dá, devido ao aumento do número de finos na mistura, sendo necessário adicionar mais água e aditivos para aproximar os resultados diante do traço referência.

A figura 13 a seguir mostra o tempo de escoamento dos traços ensaiados de acordo com o mini V funil.

Figura 13 – Tempo de Escoamento no Funil V



Fonte: Autores (2021)

Conforme realizada os diferentes traços propostos no estado fresco, foi analisado que com o aumento da adição de MCS, a argamassa ficava menos plástica e apresentava piora na trabalhabilidade, necessitando do aumento da relação a/c e o aumento na quantidade de aditivo plastificante, para obter uma mistura com maior viabilidade. Diante dos resultados apresentados no funil V, observa-se a diminuição no tempo de escoamento, devido as adições de água e superplastificantes na mistura.

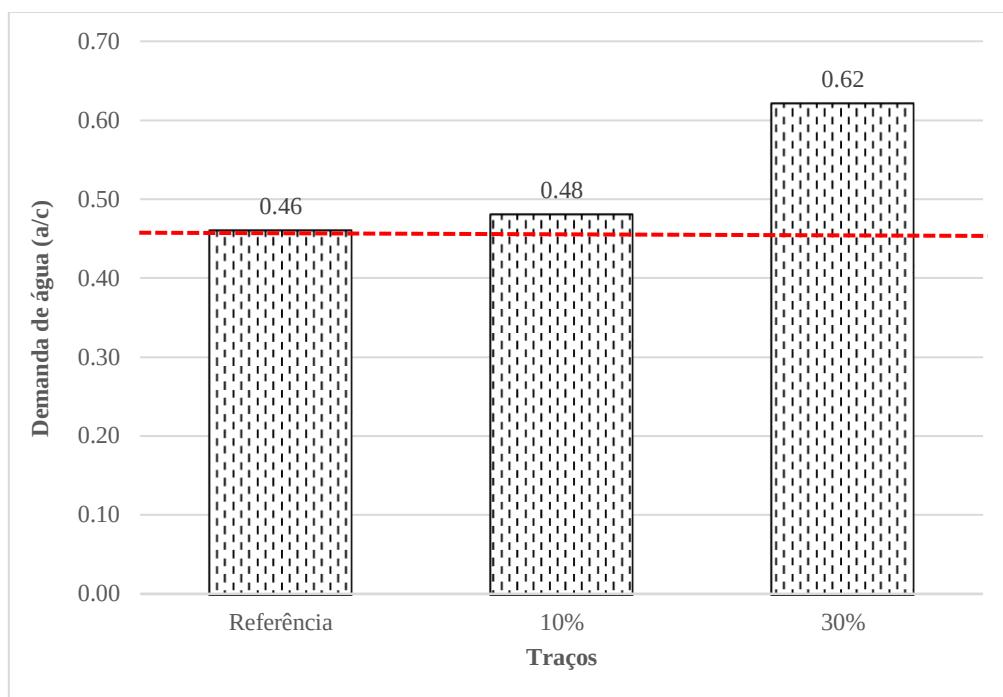
4.6.2 Ensaios em concreto

Devido a pandemia de COVID-19 no ano de publicação desta pesquisa, houve a dificuldade de obter resíduo cerâmico beneficiado, possibilitando analisar apenas os teores de 10% e 30% de substituição do cimento em concreto.

Para a análise do concreto no estado fresco, foram realizados os ensaios de abatimento do tronco de cone preconizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), no qual foi possível verificar que com o aumento da substituição do cimento pelo MCS, aumentava a

relação água cimento para atingir um slump de 17 ± 2 cm. Além da relação água cimento aumentar, houve a necessidade de correção na quantidade de aditivo incorporado, aumentando sua quantidade conforme aumento do teor de substituição. A figura 14 apresenta os resultados da demanda de água por traço de concreto.

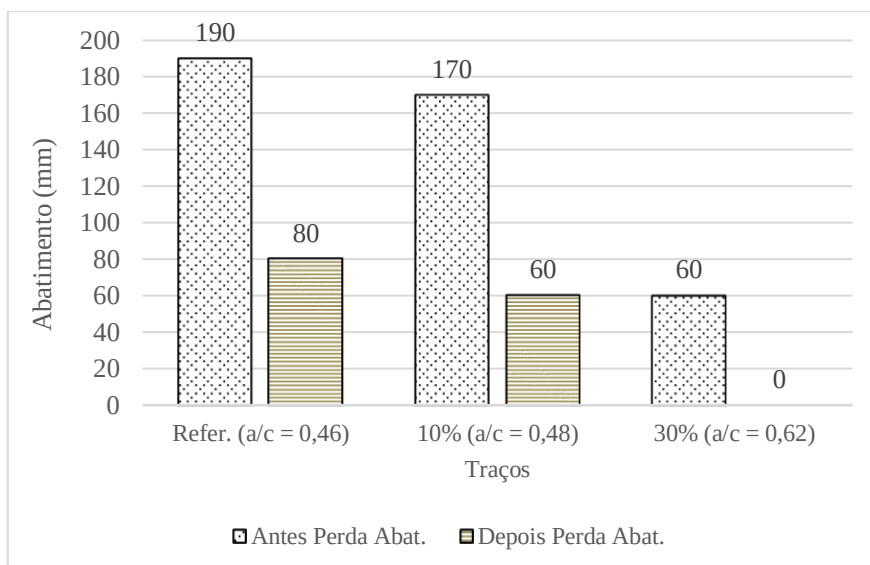
Figura 14 – Demanda de água por traço de concreto



Fonte: Autores (2021)

Posteriormente a realização do primeiro ensaio de abatimento, foram feitos os testes para verificar a perda de abatimento após 15min conforme prescrito no item 3.3.7.2, no qual observa-se uma perda significativa no abatimento do concreto. Para o teor de 30% não foi possível realizar sua perda de abatimento devido a grande absorção de água que o resíduo causou na mistura, conforme mostra o gráfico da figura 15.

Figura 15 – Perda de abatimento por traço de concreto



Fonte: Autores (2021)

Os teores de argamassa para cada traço de concreto foram determinados conforme prescrito no item 3.3.7.1, apresentando valores próximos a 55%, no qual a soma dos materiais secos para 1kg de cimento era 5 (traço médio), o somatório das areias utilizadas ficaram em torno de 2,3kg e das britas empregadas por volta de 2,7kg. Com este teor, ficou possível realizar os ensaios de slump test com uma coesão adequada do concreto.

A seguir, imagens referentes ao ensaio de slump test, realizado para cada traço de concreto mencionado anteriormente, sendo que os resultados após a perda de abatimento estão à direita.

Figura 16 – Abatimento do concreto para o traço referência



Fonte: Autores (2021)

Figura 17 – Abatimento do concreto para o traço de 10% de substituição



Fonte: Autores (2021)

Figura 18 – Abatimento do concreto para o traço de 30% de substituição



Fonte: Autores (2021)

De acordo com as imagens, foi observado uma piora na trabalhabilidade para o traço de 30% de substituição, não sendo possível realizar a perda de abatimento do concreto após 15min de mistura na betoneira, entretanto, para 10% de substituição, nota-se uma pequena variação nos resultados obtidos, comparando com o traço referência.

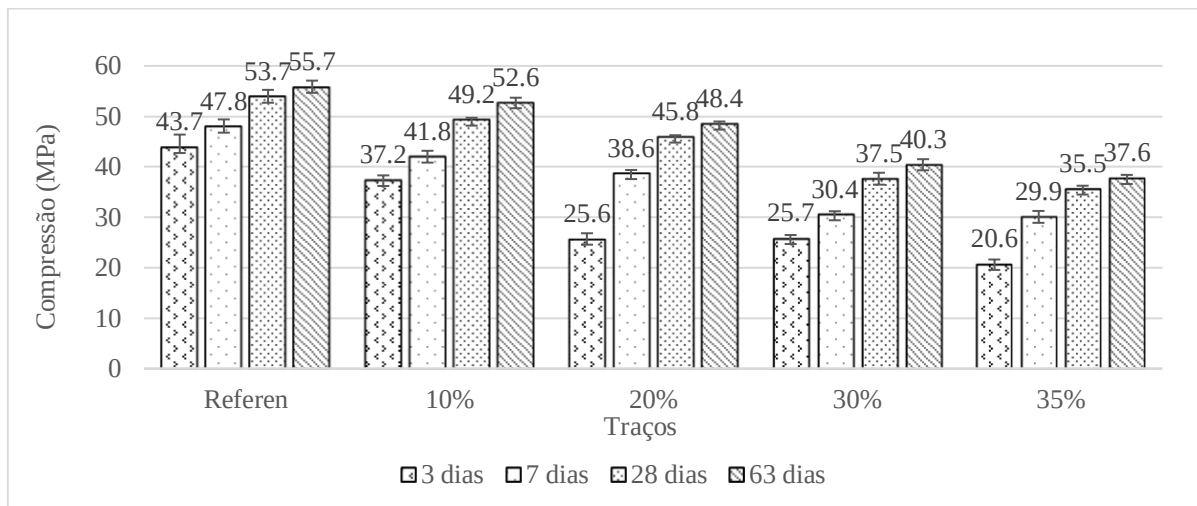
4.7 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Para a análise do desempenho no estado endurecido, foi realizado o ensaio de compressão axial, em concreto e argamassa, preconizado pela NBR 5739 (ABNT, 2007).

Para este ensaio, os corpos de prova foram submetidos ao processo de cura em câmara úmida com temperatura em torno de 25°C. Após este processo, as amostras foram preparadas para o rompimento nas idades de 3, 7, 28 e 63 dias, retificando suas faces a fim de

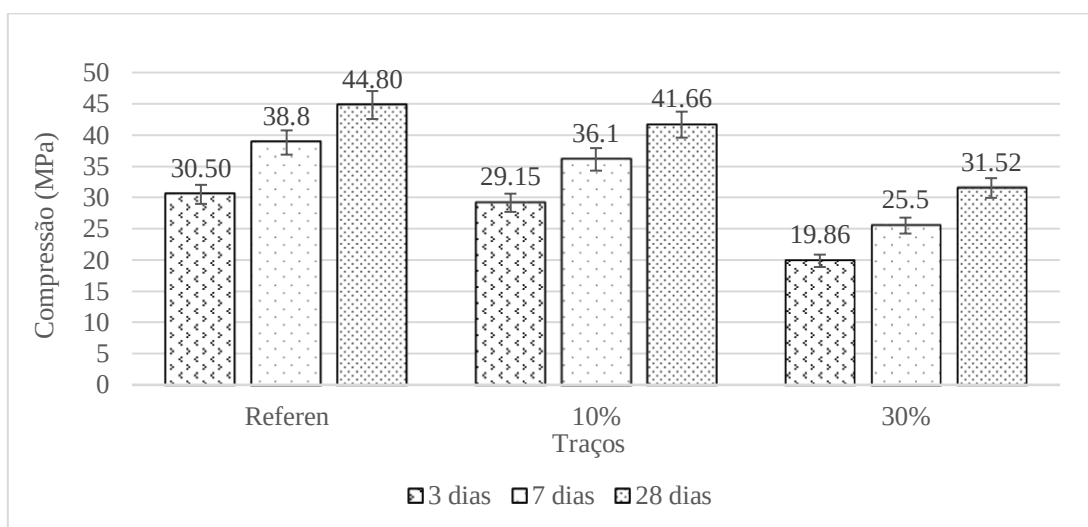
não alterar os resultados. A seguir, os resultados obtidos pelo ensaio de compressão nas argamassas e concretos da pesquisa.

Figura 19 – Resultados obtidos para os ensaios de compressão em argamassa



Fonte: Autores (2021).

Figura 20 – Resultados obtidos para os ensaios de compressão em concreto



Fonte: Autores (2021).

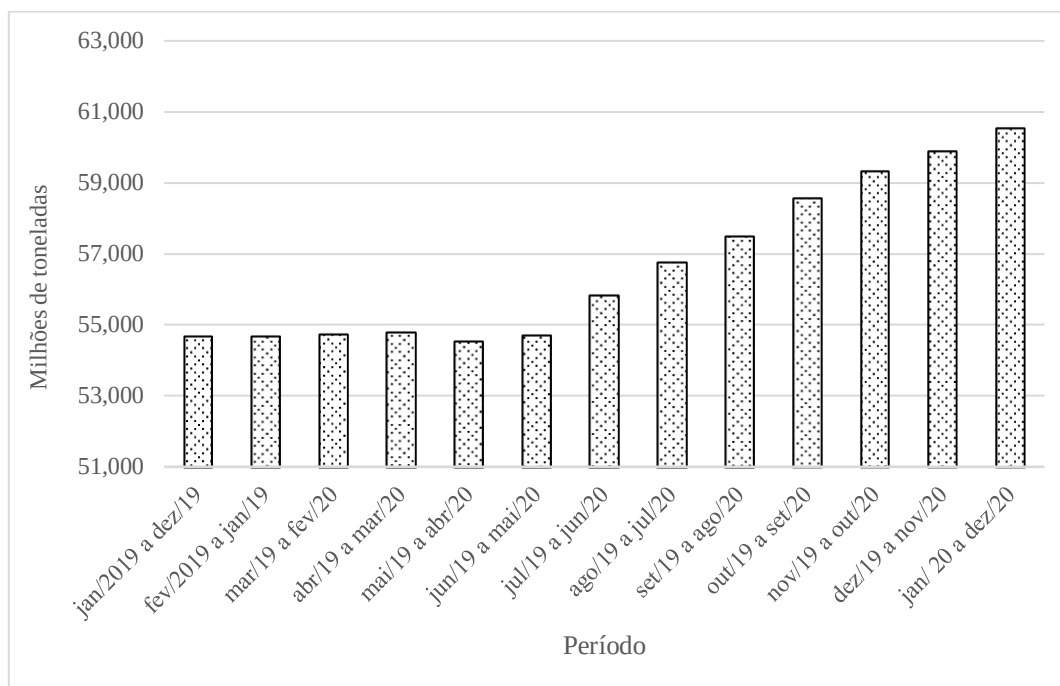
Após o rompimento dos CPs, tanto para as argamassas quanto para o concreto, observa-se a perda de resistência à compressão conforme o teor de substituição aumentava, mostrando uma redução maior que 10MPa para o traço com 30% e 35% de substituição em argamassa e em concreto.

4.8 ANÁLISE ECONÔMICA E DO IMPACTO DO USO

Segundo o levantamento realizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland, em 2020 houve um aumento nas vendas de cimento, diante do ano de 2019, totalizando 10,9%

a mais, cerca de 60,8 milhões de toneladas vendidas. A seguir, a figura 21 mostra as vendas acumuladas nos 12 meses no mercado interno.

Figura 21 – Vendas de cimento acumulado em 12 meses



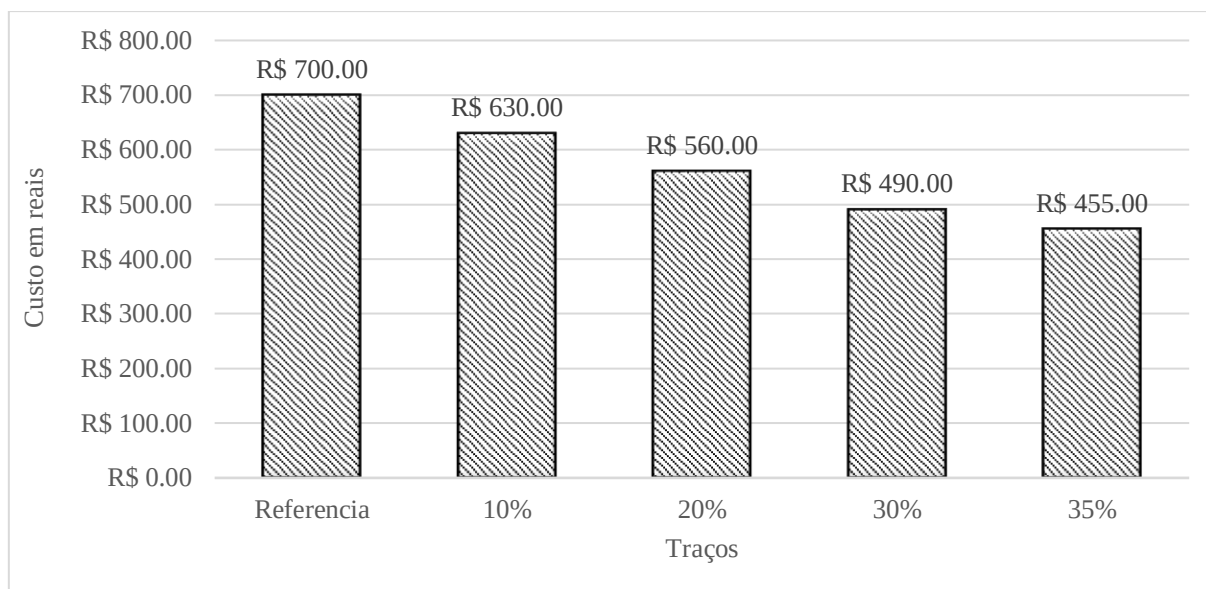
Fonte: ABCP (2021)

Diante dos dados acima, fica evidente o grande volume de cimento utilizado no país, o que preocupa devido ao processo de fabricação deste material, pois há uma grande produção de gases poluentes que possuem elevado potencial de agressão ao meio ambiente.

Além disso, foi realizado uma pesquisa no mercado local da região de Tubarão, buscando atender o cimento disponível e mais utilizado pelos consumidores da cidade, entretanto, o cimento encontrado não atende o utilizado na pesquisa, porém, utilizou-se de base para realizar a viabilidade econômica de acordo com os traços realizados pelos autores, conforme evidencia a figura 22. O custo para a saca de 40kg do cimento encontrado na região, é de R\$28,00, da marca Holcim, enquanto o custo para a produção do resíduo beneficiado, foi considerado nulo, para a seguinte pesquisa, pelo fato de se tratar de um material reaproveitável.

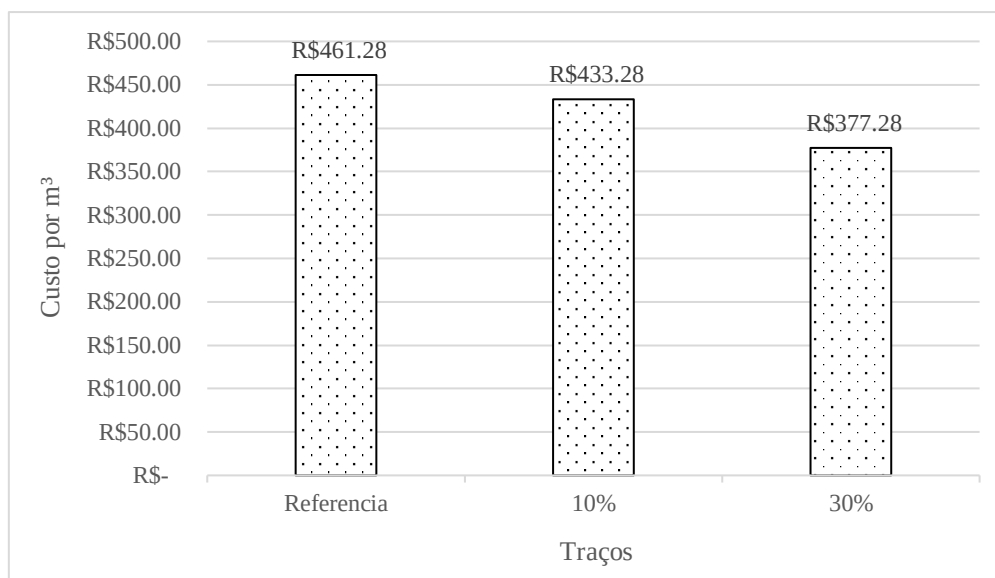
Entretanto, sabe-se que para a produção de resíduo cerâmico beneficiado, haverá custos a serem considerados até a obtenção do produto final, pois para seu beneficiamento é necessário equipamento propício para o serviço, transporte de material e colaboradores para que todo o processo funcione, isso claro, para produções em grande escala do material.

Figura 22 – Custo local por tonelada de aglomerante



Fonte: Autores (2021)

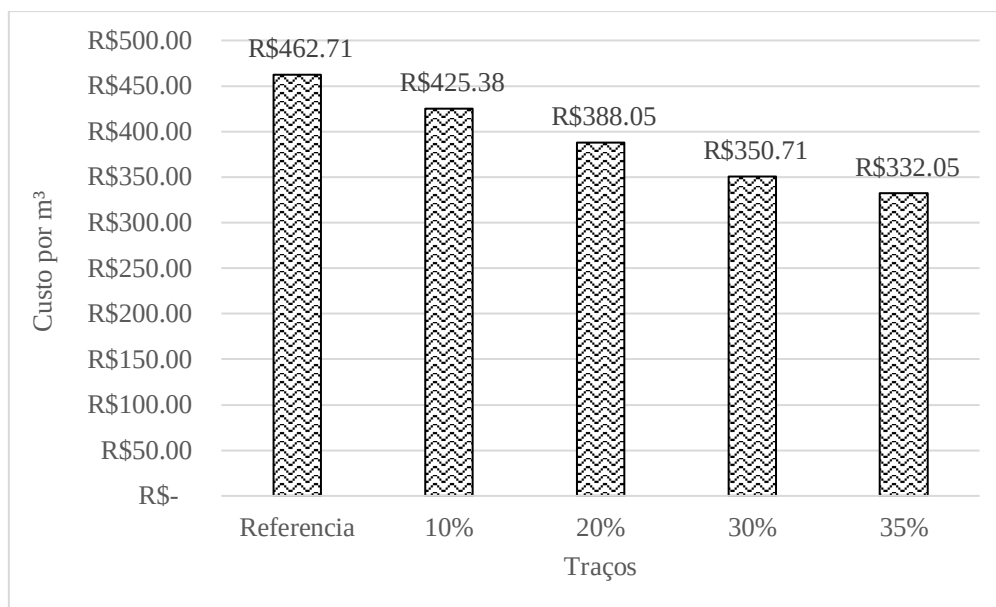
No âmbito econômico, os dados evidenciados pelos levantamentos apresentados, podem sofrer alteração caso seja implantado os teores de substituição analisados, sendo que para substituições com 35%, os resultados não se fazem satisfatórios, entretanto, para os demais traços analisados, os resultados são promissores. A seguir, as figuras 23 e 24 mostram os valores para cada traço de concreto e argamassa, desenvolvido para esta pesquisa.

Figura 23 – Custo total por m³ de concreto

Fonte: Autores (2021)

De acordo com a figura 23, podemos verificar uma redução no custo total do metro cúbico de concreto, variando entre 6% para uma substituição de 10% de material e 18% para substituições de 30% de MCS.

Figura 24 – Custo total por m³ de argamassa



Fonte: Autores (2021)

Diante da figura 24, verifica-se uma redução no custo total do metro cúbico de argamassa, variando entre 8% para uma substituição de 10% de material, 16% para substituições de 20%, 24% para substituições de 30% e 28% para substituições de 35% de MCS.

Com isso, a implantação da substituição do cimento por MCS, pode ser um aliado na diminuição de gases poluentes e gera economia para os consumidores deste material, principalmente para as CDC, que são grandes consumidores se analisado em escala nacional.

5 CONCLUSÃO

A emissão de CO₂ na atmosfera tem se tornado atualmente um grande causador das mudanças climáticas no planeta, e sabe-se que o cimento Portland tem grande influência com o aumento das emissões, devido ao seu processo de produção e consumo excessivo em todos os setores da construção civil. Com o problema apresentado, pesquisas estão sendo desenvolvidas para a substituição parcial do cimento por resíduos que contém propriedade com reações pozolânicas, como o caso desta pesquisa, que busca utilizar resíduos de telha cerâmica reaproveitado de indústrias como substituto parcial do cimento na mistura tanto de concretos quanto argamassas.

Diante da crise sanitária de COVID-19 vivenciada no momento de desenvolvimento desta pesquisa, houve problemas de fornecimento de resíduo cerâmico para a conclusão dos ensaios em todos os teores de substituição, possibilitando analisar apenas os teores de 10% e 30% de substituição no concreto, impossibilitando de construir as curvas de dosagens para os demais traços, apenas para o traço médio.

A seguinte pesquisa teve o objetivo de viabilizar a utilização parcial do resíduo de telha cerâmica na substituição parcial do cimento, verificando a influência e mudanças ocorridas na fabricação de misturas de concreto e argamassa com o aumento da adição de MCS.

O estudo foi coordenado por uma série de ensaios em laboratório, analisando todas as propriedades do resíduo, como suas características químicas, físicas, e ensaios em argamassa e concretos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, obtendo parâmetros de comparação com o traço referência.

Durante o processo de substituição parcial do cimento, foi observado que a mistura necessitava de adição de água, aumentando a relação a/c, de acordo com o aumento da substituição do cimento, para ser possível manter a trabalhabilidade adequada da mistura. Acredita-se que tal resultado provém da granulometria fina que o resíduo de telha cerâmica possui.

Com o aumento da demanda de água no traço proposto, sua resistência a compressão sofre queda de acordo com a substituição parcial do cimento, tornando-se inviável para teores acima de 35% de substituição, e também é possível analisar a considerável perda de abatimento dos traços conforme o teor aumentava.

Portanto, é correto afirmar que a substituição parcial do cimento por resíduo de telha cerâmica é viável, porém essa substituição acarretará mudanças na mistura, que devem ser verificadas para atender as solicitações de projetos. A utilização do resíduo de telha

cerâmica tem grande potencial a ser utilizado em concreteiras, por se tratar de um material praticamente reaproveitado e sem destinação, reduzindo assim a utilização e consequentemente o custo de orçamento com cimento.

Por fim, é possível verificar que a utilização do resíduo cerâmico pode trazer diversos benefícios, tanto economicamente, diminuindo os custos com elementos cimentícios, quanto ao meio ambiente, reduzindo parcialmente o consumo de cimento e reaproveitando um material que está sendo descartado pelas indústrias. Os procedimentos em laboratório se manifestaram promissores, analisando o material de uma forma abrangente, obtendo resultados semelhantes ao traço referência, possibilitando a viabilidade da utilização das substituições parciais do cimento para que os MCS sejam cada vez mais implantados pelas concreteiras.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a avaliação dos custos, logística do transporte e beneficiamento do MCS estudado nesta pesquisa, para fins de aplicação regional. Além disso, verificando o comportamento deste material nos demais traços, como por exemplo, em um traço rico e pobre, validando seu comportamento em análises no estado fresco e endurecido.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895:** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12006:** Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant. Rio de Janeiro, 1990. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos – Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro. ABNT, 2014. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5:** Concreto auto-adensável. Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2 ed. Rio de Janeiro. ABNT, 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro. ABNT, 2019. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro. ABNT, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11513:** Materiais granulares usados em fundição – Determinação da massa específica pelo uso do frasco volumétrico de “Le Chatelier”. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67.** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1998.

BAUER, L. A. F. (Coord) **Materiais de Construção** 1. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 1994. 435p.

BATTAGIN, A. F.. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C.. **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 6. p. 185-232.

CASTRO, Alessandra Lorenzetti de et al. **Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha**. Cerâmica, v. 63, n. 365, p. 65-76, 2017.

CELIK, K.; MERAL, C.; GURSEL, A. P.; MEHTA, P. K.; A. HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M.. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and concrete composites**, [s.l.], v. 56, p.59-72, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003>.

CINCOTTO, M. A.. Reações de hidratação e pozolânicas. In: ISAIA, G. C.. **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 11. p. 381-414.

DAL MOLIN, D. C. C.. Adições minerais. In: ISAIA, G. C.. **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 8. p. 261-310.

DESIR, J. M. et al. **Avaliação da Contribuição da Atividade Pozolânica do Resíduo de Tijolo Moído na Resistência de Argamassas**. In: INTER AMERICAN CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN ECOLOGICAL AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION, Rio de Janeiro, 2005. Proceedings... Rio de Janeiro: Universidade Estadual Norte Fluminense, 2005.

FERNANDES, Antonio Carlos et al. **A variação das propriedades da massa cerâmica em função das características físico-químicas, mineralógicas e texturais de argilas da região de Santa Gertrudes–SP**. Cerâmica Industrial, v. 3, n. 4-6, p. 24-29, 1998.

FONSECA, Adriana Pinheiro et al. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. 2006.

GAVA, G. P.. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica**. 1999. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GROSS CO2 emissions - Weighted average excluding CO2 from on-site power generation - Grey and white cementitious products. **Global Cement and Concrete Association**, 2020. Disponível em: <<https://gccassociation.org/gnr/>>. Acesso em: 11 de nov. de 2020.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOPPE FILHO, J.. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 318 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K.. **Pozzolanic and cementitious materials**. Advances in Concrete technology, v. 1, Amsterdam, Holanda: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MAURY, Maria Beatriz; BLUMENSCHNEID, Raquel Naves. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente**. 2012.

MARTINS, Monica Menegaz. **Investigação da influência do uso de Materiais Cimentícios Suplementares em substituição parcial ao Cimento Portland**. 2018. 79f. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) - Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

MEDEIROS, R.. **Influência da modificação das características da cinza volante nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido**. 2018. 243 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MEHTA, P K; MONTEIRO, P J M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 742 p. Edição: Nicole Pagan Hasparyk.

NANOCEM. **Cement, concrete and emissions: The need for research**. 2016. Disponível em: <<http://www.nanocem.org/uploads/Modules/Resources/nanocem---factsheet-1---a4.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2016.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016. 912 p. Tradução de: Rui Cremonini.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p. Tradução de Eng. Salvador E. Giammusso.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto** Trad. de Ruy Alberto Cremonini, 2.ed. Porto Alegre, Bookman, 2013.

RAMANATHAN, Sivakumar et al. Predicting the degree of reaction of supplementary cementitious materials in cementitious pastes using a pozzolanic test. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 204, p.621-630, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.173>.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento: Aspectos de microestrutura das pastas**. 2004. 274f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

RELATÓRIO de ensaios. **Cimento Itambé**, 2021. Disponível em: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/blade/_assets/pdf/relatorios/20213/CP-V-ARI.pdf . Acesso em: 20 de abr. de 2021.

REZENDE, Mariana Felicetti. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland como mecanismo de desenvolvimento limpo**. 2016.

SALES, Angela Teresa Costa; ALFERES FILHO, Ricardo dos Santos. **Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto**. 2014.

SCHNEIDER, M.. Process technology for efficient and sustainable cement production. **Cement and concrete research**, [S.I.], v. 78, p.14-23, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.014>.

SOARES, S.R.; CASTILHOS Jr., A.B.; MARTINS, A.; BREITENBACH, F.E.; LUPATINI, G. **Análise do ciclo de vida de produtos (revestimento, blocos e telhas) do setor cerâmico**

da indústria de construção civil. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. (Relatório parcial I/ IV)

SOUZA, Aline Ferreira de et al. **Otimização do uso de aditivo estabilizador de hidratação do cimento em água de lavagem dos caminhões-betoneira para produção de concreto.** 2007.

SOUZA, A. F. **“Otimização do uso de aditivos estabilizadores de hidratação do cimento em água de lavagem dos caminhões-betoneira para a produção de concreto”**, Dissertação M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2007.

SURANENI, Prannoy et al. New insights reactivity testing of supplementary cementitious materials. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 103, p.331-338, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.017>.

VENDAS de cimento crescem 11% em 2020. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2021. Disponível em: [https://abcp.org.br/imprensa/vendas-de-cimento-crescem-11-em-2020/#:~:text=As%20vendas%20de%20cimento%20no,Ind%C3%BAstria%20de%20Cimento%20\(SNIC\)](https://abcp.org.br/imprensa/vendas-de-cimento-crescem-11-em-2020/#:~:text=As%20vendas%20de%20cimento%20no,Ind%C3%BAstria%20de%20Cimento%20(SNIC).). Acesso: 19 de mai. 2021.

VIEIRA, C. M. F.; DE HOLANDA, J. N. F.; PINATTI, D. G. **Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes-RJ.** Cerâmica, v. 46, n. 297, p. 14-17, 2000.

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development (2012) **Diretrizes para o Relatório e Monitoramento das Emissões na Indústria de Cimento.** Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento. Brasília. 40 pp. v. 02

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, (WBCSD). **Toward a sustainable cement industry.** Substudy 8: climate change. By Ken Humphreys and Maha Mahasen. 2002a.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, (WBCSD). **The cement sustainability initiative, our agenda for action.** 2002b.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, (WBCSD). **Climate Change.** 2002c.

ZANOTTO, Edgar Dutra; MIGLIORE JR, Angelo Rubens. **Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução.** Cerâmica, v. 37, n. 247, p. 7-16, 1991.