

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CÍVIL

AMANDA CASSIOLI DUTRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FINURA DO CIMENTO PORTLAND EM
DIFERENTES NIVEIS DE MOAGEM NAS PROPRIEDADES DOS ESTADOS
FRESCO E ENDURECIDO EM ARGAMASSAS**

VITÓRIA
2022

AMANDA CASSIOLI DUTRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FINURA DO CIMENTO PORTLAND EM
DIFERENTES NIVEIS DE MOAGEM NAS PROPRIEDADES DOS ESTADOS
FRESCO E ENDURECIDO EM ARGAMASSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ronaldo Pilar

VITÓRIA

2022

**CT UFES****Centro Tecnológico
Colegiado do Curso de Engenharia Civil-CCEC**

ATA DE DEFESA DO PROJETO DE GRADUAÇÃO

Título: Estudo da influência da finura do cimento Portland em diferentes níveis de moagem nas propriedades dos estados fresco e endurecido em argamassas.

Aluna: Amanda Cassioli Dutra.

Matrícula: 2016202369.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Pilar.

Data da defesa: 25/08/2022

Local: LEMAC - 19

Critérios	Notas
Apresentação	
Monografia	
Conhecimento sobre o assunto	
Média Final =	

Banca Examinadora	Assinatura
Prof. Dr. Ronaldo Pilar (Orientador)	
Profª. Drª. Rudiele Schankoski (Examinadora)	
Eng. Otávio Gaigher Simões (Examinador)	

Observações:

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Presidente da sessão

*“Sou só mais alguém querendo encontrar
A minha própria estrada pra trilhar.”*

- Sandy e Junior 2002

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar esse espaço aqueles que tornam essa caminhada mais tranquila.

A Deus porque sem ele nada seria possível. Ele que me deu forças e capacidade de enfrentar os desafios dessa caminhada e é o responsável por colocar todos vocês em minha vida. A Nossa Senhora por interceder ao seu lado por minha vida e por minha segurança.

A minha família, vocês me apoiaram nesse sonho e mergulharam de cabeça comigo. Ao meu pai, Emmanuel Vidigal Dutra, que se dedicou a pagar meu estudo para o vestibular e sempre se mostrou muito orgulhoso de mim. A minha irmã, Andreyra Cassioli Dutra, que sempre me incentivou a ter coragem e resistência. E com todo meu coração a minha mãe, Maria Cassioli. Mãe, eu não sei o que eu faria nesse mundo se eu não tivesse a senhora. Desculpa pelas dores de cabeça, pelas noites em que estive preocupada com as minhas provas e pela loucura que foi tudo isso. Obrigada pelo seu amor, seu apoio e suas orações. Obrigada por lembrar que eu deveria me alimentar e beber água. Obrigada por estar comigo, todos os dias e em todos os momentos.

Agradeço ao Prof. Dr. Ronaldo Pilar que com paciência e dedicação me orientou ao longo deste trabalho. Agradeço também à Prof.^a Dr.^a Rudiele Aparecida Schankoski e ao Eng. Otávio Gaigher Simões por aceitarem prontamente ao convite para compor a banca deste trabalho.

Agradeço aos professores que fizeram parte da minha formação ao longo do curso. Que me incentivaram e estiveram presentes ao longo da minha caminhada. Gostaria de deixar meu agradecimento especial aos seguintes professores: A Prof.^a Dr.^a Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira, sempre muito dedicada, me proporcionou a oportunidade de realizar Iniciação Científica, além de renovar o brilho dos meus olhos, fundamental para que eu persistisse nessa jornada acadêmica. A Prof.^a Dr.^a Jaqueline da Costa Ferreira, por ser tão didática e atenciosa, mostrando sempre que é possível ministrar a aula de maneira bondosa, trouxe tranquilidade para as minhas aulas de Cálculo III. A Prof.^a Dr.^a Karla Maria Wingler Rebelo, com quem me identifiquei de imediato, sempre ressaltou a importância de estarmos com a cabeça boa, e sempre amparados

das pessoas que amamos para conseguir concluir a jornada mais difícil da minha vida. Ao Prof. Dr. Marcos Antônio Campos Rodrigues, que confiou em mim para ser monitora de uma de suas disciplinas, onde eu pude me provar capaz, mesmo não achando que conseguiria. A Prof.^a Dr.^a Miriam de Magdala Pinto, por ter reacendido em mim a vontade de ser Engenheira, resolver problemas, saindo totalmente da minha zona de conforto nessa reta final de curso, me lembrando o porquê eu amo a Engenharia. A Prof.^a Dr.^a Romarly Fernandes da Costa por ter se tornado praticamente uma amiga, nosso contato transcendeu a sala de aula, sempre foi muito carinhosa e atenciosa com todos, uma pessoa ímpar da qual eu tive o prazer de conhecer.

Minha Gratidão ao meu colega Luís Ernesto da Silva Lampert, por ter desenvolvido comigo o início desse trabalho, em meio a uma pandemia e tantas incertezas. Por se disponibilizar a reuniões para sanar minhas dúvidas e me tranquilizar, independente de horário e dia.

Gostaria de agradecer aos meus amigos como um todo, mas em especial aqueles que quando conheci mudaram o rumo da minha história na UFES. Felipe, Luciano, Pablo e Viviane, vocês estiveram comigo durante todo o curso e sem saber me retiraram do fundo do poço. Me tornaram especial e mostraram que ali, naquele grupinho, eu poderia ser eu mesma. Sem julgamentos, sem controles e sem precisar de “leveza”. Antes de conhecer vocês, eu aprendi que ser um amigo leve é não reclamar, não cobrar, ou seja, segurar a língua para não incomodar. E como vocês me incomodam, assim como eu incomodo vocês. Ter e ser amigo muitas vezes requer paciência, que não temos, porém eu sei que por vocês sempre serei recebida. Vocês me deram ingressos para acompanhar a jornada de vocês e foi recíproco! Hoje, eu estou aqui feliz por vocês estarem na minha plateia como eu estou na de vocês.

Também gostaria de agradecer a Angelica, minha dupla não-dupla. Desde o começo você sempre foi um *Angel*, se tornou meu diário, incentivo e por vezes me mandou “não desiste, não”. Então Angel, eu não desisti, e foi um privilégio para mim te conhecer.

Gostaria de agradecer ao Ronald, Thauani e Thaynara, pois essa caminhada acadêmica não começou dentro da universidade. Juntos, rachamos muitas

coisas. Rachamos o almoço esquentadinho no micro-ondas, as lembranças do pré-vestibular, as dores de não conseguir a tão sonhada vaga, e claro, a nossa cara. Rachamos as nossas dúvidas e nossas incertezas, nossos medos, nossos sonhos e nossas conquistas. Obrigada por dividirem comigo tantas histórias e momentos. Não poderia deixar de agradecer a Victória, por ser tão amável e compreensiva no meu começo de faculdade quando eu estava totalmente insuportável. Gostaria de agradecer a todos meus amigos que chegaram até aqui comigo, inclusive aos que não citei nominalmente, porque eu sei que fui chata, ausente e mal-humorada. Vocês me mantiveram firme, me deram colo e ombro para chorar. Amo vocês. Obrigada.

E por fim a você, Landy Lucas Scalser Coutinho, eu gostaria de começar te agradecendo por compartilhar tantos sonhos comigo. Quero agradecer primeiramente ao meu colega de classe de 2011, que disputava comigo na aula da professora de matemática, quem desvendaria primeiro os enigmas, ou quem iria mais para as OBMEP. Ao meu parceiro de provas em 2012, onde se ouvia que era proibido que provas em duplas ou trio a gente estivesse no mesmo time, afinal, “Amanda e Landy juntos não ajudam os amigos”. E, principalmente, gostaria de agradecer ao meu melhor amigo de 2013, que acreditou em mim, me impulsionou e me incentivou a entrar na faculdade que eu queria! Agora, em 2022, gostaria de dedicar todo esse trabalho ao meu companheiro de vida. Você, mais do que ninguém, me viu perdida e mesmo assim nunca deixou faltar a esperança que eu precisava. Você é a minha base, o meu suporte e por diversas vezes me carregou no colo! Esse trabalho é por você e para você, que me enxergou quando nem eu mesma conseguia. Obrigada por ter caminhado comigo, por ser casa quando eu mais precisava e por nunca me deixar desistir. Te amo e te dedico todo esse esforço, pois ele foi moldado em mim todas as vezes que eu olhava dentro dos seus olhos e via o orgulho que sentia, e eu sempre tentei fazer por merecê-lo, espero que eu tenha conseguido.

DUTRA, A. C. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FINURA DO CIMENTO PORTLAND EM DIFERENTES NÍVEIS DE MOAGEM NAS PROPRIEDADES DOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO EM ARGAMASSAS**. 2022. 91 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

RESUMO

O Cimento Portland (CP) é amplamente utilizado na engenharia na produção de concretos. Com demandas maiores e seus impactos cada vez mais altos, alguns países já desenvolvem concretos com cimentos ultrafinos, como é o caso do Japão, que utiliza cimentos ultrafinos para, além de preencher pequenas rachaduras, atender a requisitos de impacto ecológico. Com a sua real importância e visando atender esses requisitos, se torna inviável que não tenhamos estudos aprofundados sobre as propriedades e características do CP em diferentes níveis de moagem. O material obtido pela moagem resulta em uma alta absorção de água, uma redução na capilaridade e permeabilidade das argamassas e concretos. Por consequência, há uma diminuição em sua trabalhabilidade. Este trabalho teve como principal objetivo avaliar a interferência da finura do CP nas propriedades das argamassas, nos estados fresco e endurecido em diferentes níveis de moagem, através dos ensaios de consistência, teor de ar incorporado, calorimetria por condução e resistência à compressão. A metodologia utilizada foi, inicialmente, uma análise dos principais conceitos a respeito do tema, a seleção dos materiais utilizados no processo de moagem, e nos ensaios de finura Blaine e resistência, a fim de se determinar o aditivo promotor de moagem. Em seguida, foram realizados testes com finalidade de determinar as propriedades das argamassas. Os resultados obtidos apontam que a finura do CP tem influência significativa em relação ao processo de hidratação e tempo de início de pega. Em relação a resistência à compressão, as argamassas moldadas com CP mais fino apresentaram os maiores valores. Após a análise dos resultados obtidos, foi possível concluir que quanto maior a quantidade de partículas finas que compõe o cimento, as argamassas apresentaram maiores resistências, menor trabalhabilidade e maior superfície específica, fazendo com que as reações de hidratação ocorram de forma mais acelerada. Assim sendo, o processo de moagem do cimento resultou uma melhora significativa nas propriedades das argamassas.

Palavras-chave: Cimento, finura, moagem, resistência, hidratação.

DUTRA, A. C. **STUDY OF THE INFLUENCE OF THE THINNESS OF PORTLAND CEMENT IN DIFFERENT GRINDING LEVELS IN THE PROPERTIES OF THE FRESH AND HARDNESS STATES IN MORTARS.** 2022. 91 f. Dissertation (Completion of Course Work) – Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2022.

ABSTRACT

Portland Cement (PC) is widely used in engineering in the production of concrete. With greater demands and increasingly higher impacts, some countries already develop concrete with ultra-fine cements, as is the case of Japan, which uses ultra-fine cements to, in addition to filling small cracks, meet ecological impact requirements. With its real importance and to meet these requirements, it becomes unfeasible that we do not have in-depth studies on the properties and characteristics of PC at different grinding levels. The material obtained by grinding results in a high water absorption, a reduction in capillarity and permeability of mortars and concretes. As a result, there is a decrease in its workability. The main objective of this work was to evaluate the interference of the fineness of the PC on the properties of the mortars, in the fresh and hardened states at different grinding levels, through consistency tests, incorporated air content, conduction calorimetry and compressive strength. The methodology used was, initially, an analysis of the main concepts on the subject, the selection of materials used in the milling process, and in the Blaine fineness and strength tests, to determine the milling promoter additive. Then, tests were carried out to determine the properties of the mortars. The results obtained indicate that the fineness of the PC has a significant influence on the hydration process and setting time. Regarding the compressive strength, the mortars molded with finer PC showed the highest values. After analyzing the results obtained, it was possible to conclude that the greater the number of fine particles that make up the cement, the mortars presented greater resistance, less workability and greater specific surface, causing the hydration reactions to occur more accelerated. Therefore, the cement grinding process resulted in a significant improvement in the properties of the mortars.

Keywords: Cement, fineness, grinding, strength, hydration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resistência a compressão, após substituição do cimento convencional pelo moído (CM).....	28
Figura 2 – Calor de Hidratação para diferentes finuras do cimento.	29
Figura 3 – Gráfico da cinética de hidratação.....	29
Figura 4 – Fluxograma da metodologia aplicada.....	32
<i>Figura 5 – Areia Normal Brasileira - Grossa (#16).</i>	34
Figura 6 – Areia Normal Brasileira - Média Grossa (#30).....	34
Figura 7 – Areia Normal Brasileira - Média Fina (#50).	34
Figura 8 – Areia Normal Brasileira - Fina (#100).	34
Figura 9 – Areia utilizada para ensaios.	35
Figura 10 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.	37
Figura 11 – Aditivos promotores de moagem.....	38
Figura 12 – Aditivo superplastificante.....	39
Figura 13 – Moinho de bolas.	40
Figura 14 – Permeabilímetro Blaine.	41
Figura 15 – Areia normalizada.	42
Figura 16 – Areia normatizada após pesagem.....	43
Figura 17 – Cimentos separados após pesagem.....	44
Figura 18 – Conjunto de materiais após pesagem.	45
Figura 19 – Moldes para corpo de prova.....	46
Figura 20 – Corpos de prova com face superior protegida.	46
Figura 21 – Corpos de provas desmoldados e identificados, submersos no tanque de cura.	47
Figura 22 – Corpo de prova retificado, pronto para o ensaio a resistência.	48
Figura 23 – Argamassadeira.	51
Figura 24 – Recipiente.	52
Figura 25 – Mesa para índice de consistência.	53
Figura 26 – Tronco de cone moldado.....	54
Figura 27 – Abatimento do tronco de cone de argamassa.....	55
Figura 28 – Medição do diâmetro com paquímetro.	55
Figura 29 – Equipamentos para ensaio de calorimetria.	56
Figura 30 – Amostras prontas para medição.....	57

Figura 31 – Corpos de prova desmoldados e identificados após 24h.....	58
Figura 32 – Tanque de cura com água não corrente, saturada de cal.....	58
Figura 33 – Retificadora.....	59
Figura 34 – Processo de retifica dos corpos de prova.....	59
Figura 35 – Corpos de provas com superfícies niveladas.....	60
Figura 36 – Corpos de provas com superfícies niveladas.....	60
Figura 37 – Medição de diâmetro utilizando paquímetro.....	61
Figura 38 – Medição de altura utilizando paquímetro.....	61
Figura 39 – Prensa para ensaio de ruptura.....	62
Figura 40 – Corpo de prova pronto para ensaio de resistência a compressão.....	63
Figura 41 – Corpos de provas compactados.....	65
Figura 42 – Ensaio de resistência à compressão axial.....	66
Figura 43 – Correlação entre massa específica dos cimentos utilizados e teor de ar incorporado.....	67
Figura 44 – Argamassa com CC após ensaio de consistência.....	69
Figura 45 – Argamassa com MD após ensaio de consistência.....	69
Figura 46 – Argamassa de referência (CC) no recipiente.....	70
Figura 47 – Argamassa com M1.....	71
Figura 48– Argamassa com M2.....	71
Figura 49 – Argamassa com MD.....	72
Figura 50 – Ensaio de calorimetria.....	73
Figura 51 – Calor gerado ao longo do tempo.....	75
Figura 52 – Calor gerado – CC x M1.....	76
Figura 53 – Calor gerado – CC x M2.....	76
Figura 54 – Calor gerado – CC x MD.....	77
Figura 55 – Análise dos picos de Hidratação.....	78
Figura 56 – Calor total acumulado ao longo do tempo.....	79
Figura 57 – Influência do teor de ar incorporado no ganho de resistência mecânica aos 7 e 28 dias.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de composição do cimento Portland.	21
Tabela 2 – Densidade de empacotamento e índices de vazios para diferentes taxas de substituição por cimentos superfinos.	31
Tabela 3 – Especificações físicas e químicas do cimento CP V-ARI.	33
Tabela 4 – Dados obtidos pelo ensaio de peneiramento.	36
Tabela 5 – Resultados das amostras e limites da distribuição granulométrica.	36
Tabela 6 – Porcionamento para moldagem de 3 corpos de prova.	43
Tabela 7 – Quantidade de insumos das argamassas para um teor de 0,08% de aditivo promotor de moagem.	44
Tabela 8 – Dados para corpos de prova com 0%.	48
Tabela 9 – Dados para corpos de prova com AD02.	48
Tabela 10 – Dados para corpos de prova com AD04.	49
Tabela 11 – Dados para corpos de prova com AD06.	49
Tabela 12 – Porcionamento para argamassa.	50
Tabela 13 – Porcionamento das argamassas para rompimento aos 7 dias de idade.	50
Tabela 14 – Porcionamento das argamassas para rompimento aos 7 dias de idade.	51
Tabela 15 – Valores de finura de Blaine e massa específica.	64
Tabela 16 – Resultado dos ensaios de resistência.	66
Tabela 17 – Densidade das argamassas.	67
Tabela 18 – Índice de consistência	68
Tabela 19 – Massa das argamassas para ensaio de calorimetria.	70
Tabela 20 – Valores adotados para cálculo do calor específico.	73
Tabela 21 – Capacidade térmica das amostras.	74
Tabela 22 – Resultados calorimétricos obtidos pela análise gráfica.	77
Tabela 23 – Corpos de prova de referência (CC) para ensaio aos 7 dias.	79
Tabela 24 – Corpos de prova de referência (CC) para ensaio aos 28 dias.	80
Tabela 25 – Corpos de prova M1 para ensaio aos 7 dias.	80
Tabela 26 – Corpos de prova M1 para ensaio aos 28 dias.	81
Tabela 27 – Corpos de prova M2 para ensaio aos 7 dias.	81
Tabela 28 – Corpos de prova M2 para ensaio aos 28 dias.	81
Tabela 29 – Corpos de prova MD para ensaio aos 7 dias.	82

Tabela 30 – Corpos de prova MD para ensaio aos 28 dias.	82
Tabela 31 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP	–	Associação Brasileira de Cimento Portland.
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AD02	–	Aditivo Promotor de Moagem 02.
AD04	–	Aditivo Promotor de Moagem 04.
AD06	–	Aditivo Promotor de Moagem 06.
Al ₂ O ₃	–	Óxido de Alumínio.
ARI	–	Alta Resistência Inicial.
BC	–	Baixo Calor de Hidratação.
CaCO ₃	–	Carbonato de Cálcio.
CaO	–	Óxido de Cálcio.
CC	–	Cimento Convencional.
CM	–	Cimento Moído.
CP	–	Cimento Portland.
DMC	–	Dimensão Máxima Característica.
EPS	–	Poliestireno expandido.
Fe ₂ O ₃	–	Óxido de Ferro III.
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IPT	–	Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
M1	–	Cimento Convencional Moído Durante 1h.
M2	–	Cimento Convencional Moído Durante 2h.
MD	–	Cimento Convencional Com Aditivo Promotor de Moagem, Moído Durante 2h.
MF	–	Módulo de Finura.
MgO	–	Óxido de Magnésio.

MPa	–	Megapascal.
NBR	–	Norma Brasileira.
NM	–	Norma Mercosul.
RS	–	Resistente a Sulfato.
SiO ₂	–	Dióxido de Silício.
SNIC	–	Sindicato Nacional da Indústria de Cimento.
UFES	–	Universidade Federal do Espírito Santo.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo geral.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 CIMENTO PORTLAND	20
2.1.1 Tipos de cimento Portland.....	20
2.1.2 Composição do cimento Portland.....	21
2.1.2.1 Clínquer	22
2.1.2.2 Adições.....	22
2.2 MICROESTRUTURA NA INTERFACE CIMENTO.....	24
2.3 INFLUÊNCIA DA FINURA DO CIMENTO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	26
2.3.1 Na composição química e mineral	27
2.3.2 Na resistência.....	27
2.3.3 Na hidratação	28
2.3.4 Na porosidade	30
2.3.5 Na fluidez.....	30
3. MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL	32
3.1 MATERIAIS.....	32
3.1.1 Cimento Portland.....	32
3.1.2 Agregado miúdo	33
3.1.3 Aditivos	37
3.1.3.1 Aditivos promotores de moagem	37
3.1.3.2 Aditivos plastificantes	38
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	39
3.2.1 Etapa I.....	39
3.2.1.1 Determinação do aditivo promotor de moagem	39

3.2.1.2 Caracterização do agregado miúdo.....	49
3.2.2 Etapa II.....	49
3.2.2.1 Composição das argamassas para avaliação de suas propriedades.....	49
3.2.2.2 Produção das argamassas para avaliação de suas propriedades	50
3.2.2.3 Determinação do índice de consistência	53
3.2.2.4 Ensaio de calorimetria	56
3.2.3 Etapa III.....	57
3.2.3.1 Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.....	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1 ETAPA I	64
4.1.1 Determinação do aditivo promotor de moagem	64
4.2 ETAPA II	66
4.2.1 Avaliação das propriedades das argamassas produzidas.	66
4.2.2 Determinação do índice de consistência	68
4.2.3 Ensaio de calorimetria	70
4.3 ETAPA III	79
4.3.1 Determinação de resistência à compressão dos corpos de prova	79
4.4 INFLUÊNCIA DO ADITIVO	84
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.1 CONCLUSÃO	85
5.2 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.....	86
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

O Cimento Portland (CP) é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes que endurece sob a ação da água. Em forma de concreto, torna-se uma pedra artificial que pode assumir formas e volumes de acordo com as necessidades de cada obra. Devido a essas propriedades, o concreto é o segundo material mais consumido pelo homem, depois da água (ABCP, 2002).

De fato, o concreto, que é um material muito utilizado em construções, é o produto de misturas de diferentes constituintes, que são, cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e aditivos. Dentre os diversos componentes, o cimento atua como um agente ligante na produção de concreto. Segundo pesquisas, alterar a finura do cimento pode afetar algumas propriedades como tempo de pega, consistência e resistência.

Nos últimos anos, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas na área de concretos, onde os pesquisadores buscam cada vez mais materiais com desempenhos superiores em termos de comportamento mecânico e durabilidade (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

As partículas de cimento ultrafinas apresentam melhor fluidez e maior resistência, tornando capaz de satisfazer as demandas de materiais a base de cimento. Com os grandes requisitos da engenharia, não se pode ignorar o fator ecológico. Desde então a pesquisa sobre a influência da finura do cimento tem crescido significativamente (Shi *et al*, 2021).

De acordo com os autores, acredita-se que com a diminuição do tamanho das partículas do cimento, a área superficial específica e a área de contato de reação aumentam, a taxa de hidratação acelera e a resistência se desenvolve rapidamente. De acordo com o princípio de efeito de acumulação, a finura do cimento tem por função preencher os poros e tornar a argamassa mais compacta.

Assim, no presente trabalho buscou-se verificar a capacidade da otimização da curva granulométrica do cimento em garantir a estabilidade da mistura, de forma que não, necessariamente, aumente seu consumo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a interferência da finura e da distribuição granulométrica do cimento Portland nas propriedades dos estados fresco e endurecido em argamassas para diferentes níveis de moagem.

1.1.2 Objetivos específicos

Por objetivo específico, tem-se:

- Avaliar o efeito dos aditivos auxiliares de moagem na finura de cimentos;
- Avaliar o efeito da finura do cimento na resistência à compressão de argamassas;
- Avaliar o tempo de pega e calor de hidratação de argamassas com diferentes finuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIMENTO PORTLAND

De acordo com a ABNT NBR 16697 (2018), o Cimento Portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos.

O engenheiro John Smeaton, por volta de 1756, estava à procura de um aglomerante que endurecesse mesmo em presença de água, para promover a rapidez e facilidade na reconstrução do farol de Eddystone, na Inglaterra. Em suas tentativas ele verificou que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de Cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (ABCP, 2002).

2.1.1 Tipos de cimento Portland

Os Cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais. São identificados por suas siglas, seguidas de sua classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI), acrescidas dos sufixos RS e BC, quando aplicáveis. O sufixo RS é designado aos cimentos resistentes à sulfatos e se aplica também a qualquer tipo de cimento que apresentar expansão menor ou igual a 0,03%, aos 56 dias quando ensaiado pelo método estabelecido pela ABNT NBR 16697 (2018), além de atender os requisitos para o seu tipo e classe. Para os cimentos com baixo calor de hidratação se utiliza o sufixo BC, para atender esse requisito o cimento deverá manter o valor máximo de calor de hidratação, após 41h, de 270 joules por grama ($J.g^{-1}$) além de atender os

requisitos do seu tipo e classe (ABNT NBR 16697, 2018). As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em Megapascal (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215 (2019). Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, apresenta ao primeiro dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 (2019) e atende aos demais requisitos estabelecidos em norma para esse tipo de cimento, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de composição do cimento Portland.

TIPO	SIGLA	CLASSE DE RESISTÊNCIA	SUFIJO	CLÍNQUER + SUFATOS DE CÁLCIO	ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO	MATERIAL POZOLÂNICO	MATERIAL CABONÁTICO			
COMUM	CP I	25, 32 OU 40	RS OU BC	95 - 100	0 - 5					
	CP I-S			90 - 94	0	0	6 - 10			
COMPOSTO COM ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO	CP II-E			51 - 94	6 - 34	0	0 - 15			
COMPOSTO COM MATERIAL POZOLÂNICO	CP II-Z			71 - 94	0	6 - 14	0 - 15			
COMPOSTO COM MATERIAL CARBONÁTICO	CP II-F			75 - 89	0	0	11 - 25			
ALTO FORNO	CP III			25 - 65	35 - 75	0	0 - 10			
POZOLÂNICO	CP IV			45 - 85	0	15 - 50	0 - 10			
ALTA RESISTÊNCIA INICIAL	CP V			ARI	90 - 100	0	0	0 - 10		
BRANCO	ESTRUTURAL			CPB	-	25, 32 OU 40	75 - 100	-	-	0 - 25
	NÃO ESTRUTURAL					-	-	-	26 - 50	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697 (2018)

2.1.2 Composição do cimento Portland

Para se conhecer as características e as propriedades dos diversos tipos de CP, a melhor maneira é estudando sua composição. Ele tem entre seus principais componentes o clínquer, pois está presente em todos os tipos de CP. Já as adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são, principalmente elas, que definem os diferentes tipos de cimento (ABCP, 2002).

2.1.2.1 Clínquer

O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila. O calcário é o carbonato de cálcio (CaCO_3) que se apresenta na natureza com impurezas como o MgO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A dolomita, que é o carbonato de cálcio e magnésio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, que forma apenas 30,4% de CaO não é utilizada na fabricação de CP. A argila para ser utilizada na fabricação do cimento é essencialmente constituída de um silicato de alumínio hidratado, geralmente contendo ferro e outros minerais em menores porcentagens. Ela fornece os óxidos: SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , necessários à fabricação do cimento. Tanto o calcário como a argila são obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento (ABCP, 2002).

2.1.2.2 Adições

Está cada vez mais comum a utilização de adições minerais para a produção do concreto, seja substituindo parcialmente o clínquer ou o cimento. A maior parte desses materiais são resíduos provenientes de indústrias e que, muitas vezes, apresentam dificuldades para uma destinação eficiente. Dessa forma, o reaproveitamento desses materiais não só reduz o impacto ambiental, mas também reduz o volume de extração de matérias-primas pela indústria da construção civil (DAL MOLIN, 2011).

Segundo o relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2013), os cimentos com adições minerais alcançaram cerca de 90% da produção e consumo no Brasil no ano de 2013. O CP-II, sozinho, foi responsável por 60% da produção total, incluindo todas as suas categorias: CP-II-E, CP-II-Z e CP-II-F. No panorama geral, o Brasil é o quinto maior produtor e o quarto maior consumidor de cimento no mundo (SNIC, 2013).

A adição de minerais no concreto tem como objetivo melhorar as características técnicas, já que estas modificam a estrutura interna da pasta de cimento hidratada e da zona de transição. E, também, promove um refinamento do volume dos poros capilares aumentando as condições de durabilidade do concreto, além de diminuir o calor de hidratação e, conseqüentemente, as fissuras de origens térmicas (SEIDLER; DAL MOLIN, 2006).

O gesso é um produto de adição final no processo de fabricação do CP, com o objetivo de regular o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. Caso não se adicionasse o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de CP. A quantidade adicionada é pequena: em geral, 3 a 6% de gesso para 97 a 94% de clínquer, em massa (ABCP, 2002).

Dentre as adições, destaca-se a escória de alto-forno obtida durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas que se assemelha a grãos de areia. Antes, as escórias de alto-forno eram consideradas um material sem muita utilidade, até que perceberam que elas também possuem propriedades de ligante hidráulico, ou seja, elas eram muito resistentes, reagem na presença de água e desenvolviam características aglomerantes de forma muito semelhante ao clínquer. Essa descoberta tornou possível a adição da escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, guardadas certas proporções, e obtendo como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final (ABCP, 2002).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais pozolânicas podem ser definidas como um material silicoso ou sílico-aluminoso, que na presença de umidade e em temperaturas ambientes, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio e formam compostos com propriedades cimentantes.

Entre as pozolânicas mais comuns estão a sílica ativa, o metacaulim, a cinza volante e a cinza casca de arroz, sendo a cinza volante a mais empregada na produção de CP IV e CP II-Z. A cinza volante difere das demais adições, pois na produção de cimentos nacionais não são incorporadas ao clínquer, mas são bastante utilizadas para melhorar as características dos concretos (DAL MOLIN, 2011).

Outros materiais pozolânicos têm sido estudados, tais como as cinzas resultantes da queima de cascas de arroz e a sílica ativa, um pó finíssimo que

sai das chaminés das fundições de ferro-silício e que, embora em caráter regional, já têm seu uso consagrado no Brasil, a exemplo de outros países tecnologicamente mais avançados (ABCP, 2002). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no Brasil, a estimativa de produção de casca de arroz foi de 11,0 milhões de toneladas, aumento de 0,2% em relação ao 3º prognóstico, e declínio de 0,6% em relação a 2020, com queda de 1,3% no rendimento médio (IBGE, 2021).

Os materiais carbonáticos são finamente moídos, com aproximadamente a mesma finura do CP, mas que, devido as suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como: aumento da trabalhabilidade e densidade, diminuição da permeabilidade, absorção de água por capilaridade e exsudação. Eles apresentam carbonato de cálcio em sua constituição tal como o próprio calcário. Quando presentes no cimento são conhecidos como fíler calcário (ABCP, 2002).

2.2 MICROESTRUTURA NA INTERFACE CIMENTO

A microestrutura de um sólido é constituída pelo seu tipo, quantidade, tamanho, forma e distribuição de fases. A parte bruta da microestrutura de um material pode ser vista a partir da sua seção transversal, enquanto os elementos mais finos geralmente são observados com a ajuda de um microscópio. O termo microestrutura é usado para a porção microscopicamente ampliada de uma macroestrutura. A ampliação a capacidade dos microscópios eletrônicos modernos é da ordem de 10⁵ vezes. Portanto, a aplicação de técnicas de transmissão e microscopia eletrônica de varredura, tornou possível a observação da microestrutura dos materiais em uma fração de um micrômetro (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Partindo do princípio de que as propriedades se originam da microestrutura interna, ou seja, as propriedades podem ser modificadas fazendo alterações adequadas na microestrutura de um material, Mehta e Monteiro (2006) observam que embora o concreto seja o material estrutural mais utilizado, sua microestrutura é heterogênea e altamente complexa.

Ao nível macroscópico o concreto pode ser considerado como um material bifásico, consistindo em partículas agregadas dispersas em uma matriz de pasta de cimento. No nível microscópico, as complexidades da microestrutura de concreto são evidentes. Por exemplo, se vários corpos de prova de concreto contendo a mesma quantidade de cimento, mas diferentes quantidades de água, forem examinados em vários intervalos de tempo, será observado que, em geral, o volume de vazios capilares na pasta de cimento hidratada diminui com a diminuição da relação água-cimento ou com o aumento da idade de hidratação. Para uma pasta de cimento bem hidratada, a distribuição não homogênea de sólidos e vazios por si só talvez possa ser ignorada ao modelar o comportamento do material. No entanto, estudos microestruturais mostraram que isso não pode ser feito para a pasta de cimento hidratada presente no concreto. Na presença de agregado, a microestrutura da pasta de cimento hidratada nas proximidades de grandes partículas agregadas é geralmente muito diferente da microestrutura da pasta no sistema (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Na microestrutura da pasta de cimento Portland, identificam-se várias fases que não estão uniformemente distribuídas e que não são uniformes em tamanho e morfologia. Além do tamanho das partículas e da temperatura de hidratação, a reatividade dos compostos do cimento Portland com a água é influenciada pela sua estrutura cristalina. Sob as condições de alta temperatura e não equilíbrio do forno de cimento, e com uma variedade de cátions presentes, as estruturas cristalinas formadas estão longe de serem perfeitas. Para Mehta e Monteiro os tipos, quantidades e características dessas fases sólidas são: Silicato de cálcio hidratado (C-S-H), essa fase constitui de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado. Apresenta uma morfologia variando de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. Hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$, também chamada de portlandita, constituem 20% a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Há tendência em formar cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos. Sulfoaluminatos de cálcio, ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida. Dependendo da distribuição granulométrica do cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na

microestrutura de pastas de cimento hidratadas, mesmo muito tempo após a hidratação.

De fato, muitos aspectos do comportamento do concreto sob tensão só podem ser explicados quando a interface pasta-agregado de cimento é tratada como uma terceira fase da microestrutura do concreto. Assim, as características únicas da microestrutura de concreto podem ser resumidas em três fases, na primeira há a zona de transição interfacial, que representa uma pequena região ao lado das partículas de agregado graúdo. Existente como uma casca fina, tipicamente de 10 a 50 μm de espessura em torno de um grande agregado, a zona de transição interfacial é geralmente mais fraca do que qualquer um dos dois principais componentes do concreto, portanto, exerce uma influência muito maior no comportamento mecânico do concreto do que é refletido pelo seu tamanho. Em segundo lugar, cada uma das três fases é em si um caráter multifásico. Por exemplo, cada partícula agregada pode conter vários minerais, além de microfissuras e vazios. Da mesma forma, tanto a pasta de cimento hidratada a granel quanto a zona de transição interfacial geralmente contêm uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras. Em terceiro lugar, ao contrário de outros materiais de engenharia, a microestrutura do concreto não é uma característica intrínseca do material, porque os dois componentes da microestrutura, a pasta de cimento hidratada e a zona de transição interfacial, estão sujeitos a alterações com o tempo, a umidade ambiental e a temperatura. A natureza altamente heterogênea e dinâmica da microestrutura do concreto são as principais razões pelas quais os modelos teóricos de relação microestrutura-propriedade, que geralmente são tão úteis para prever o comportamento dos materiais de engenharia, não são de muito uso prático no caso do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

2.3 INFLUÊNCIA DA FINURA DO CIMENTO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Para Mehta e Monteiro (2006), a finura do cimento afeta a sua reatividade com a água. Pode-se dizer que quanto mais fino o cimento, mais rapidamente ele reagirá. Para uma determinada composição, a taxa de reatividade e, portanto, o desenvolvimento de resistência pode ser aumentado por uma moagem mais fina

do cimento, porém existem alguns limites para a finura determinados pelo custo de moagem e o calor desenvolvido na hidratação.

2.3.1 Na composição química e mineral

Zhang *et al* (2011), em seu estudo sobre os efeitos da finura do cimento na composição e propriedades do cimento Portland, relatam que, devido aos diferentes processos de moagem, é provável que a composição química e mineral varie em função da finura do cimento. É apresentado ainda por eles uma análise da variação dos diferentes elementos químicos e minerais na composição dos cimentos.

A variação mais significativa foi nos índices de óxido sulfúrico, apresentando quantidades até três vezes maiores, enquanto as variações da composição mineral, foi menos significativa e mais gradual.

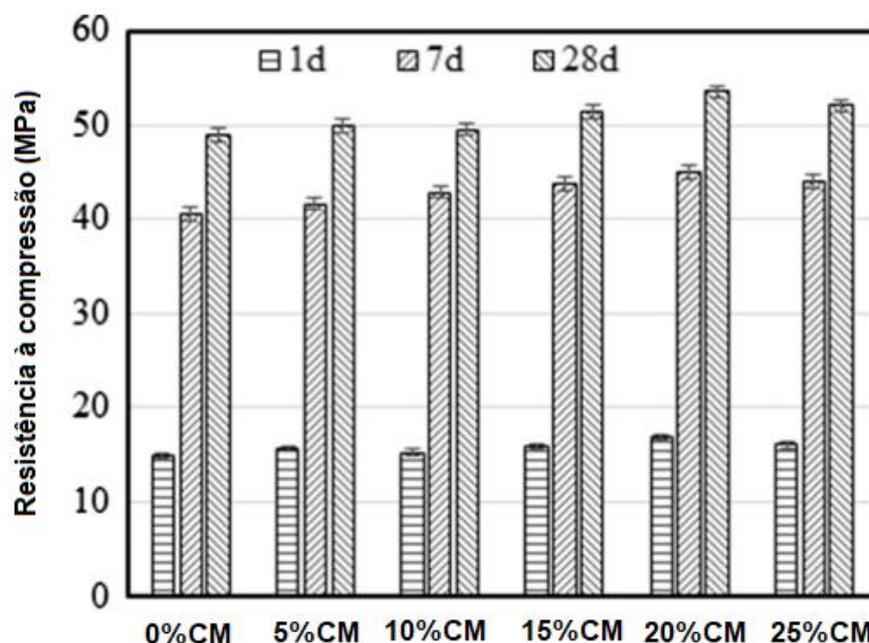
2.3.2 Na resistência

A finura dos cimentos não influencia significativamente as resistências a longo prazo, entretanto, a curto prazo, possui grande influência (LI; YANG; XIE, 2015). Os autores observaram um ganho significativo de resistência à compressão nas primeiras idades, sendo reduzido esse ganho, ao longo do tempo. Entretanto, Zhang *et al* (2011) demonstram que existe uma faixa de finura média, em que há uma otimização dos ganhos de resistência mecânica no médio prazo (28 dias), quando o diâmetro médio do cimento fica entre 8 e 24 μ m, tendo em vista que valores mais finos tendem a não agregar resistência após o período inicial de 3 dias. Portanto, recomenda-se que as adições com alta atividade ou baixa atividade (ou apenas finos inertes) estejam arranjados em frações mais finas e mais grossas, respectivamente.

A substituição parcial de cimento com finura convencional por cimento mais fino, em teores de 20%, apresenta ganhos na resistência à compressão, segundo Sajedi e Razak (2011). Resultados semelhantes foram reportados por Zhang *et al* (2017), conforme apontado no gráfico da Figura 1. Observa-se que a mistura

contendo 20% de cimento mais fino obteve os maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Figura 1 – Resistência a compressão, após substituição do cimento convencional pelo moído (CM).



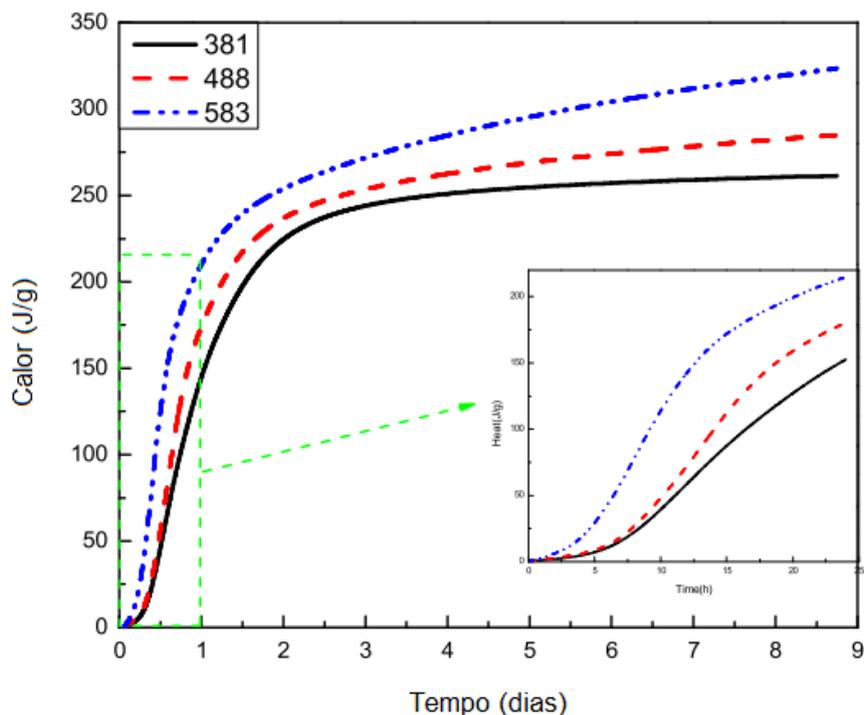
Fonte: Zhang (2017)

2.3.3 Na hidratação

A finura impacta diretamente na hidratação do cimento, principalmente a curto prazo. A hidratação pode ocorrer de duas formas: por meio da dissolução dos compostos e posterior precipitação dos hidratos da solução supersaturada, ou através das reações que ocorrem diretamente na superfície do cimento, sem que haja liberação de íons na solução (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Em ambos os processos as pequenas partículas são hidratadas primeiro, causando uma alteração no rearranjo dos grãos, e dependendo dessa nova distribuição, alguns grãos maiores pode não se hidratar no processo, o que pode acarretar um material mais poroso, visto que o material hidratado pode ocupar até o dobro do volume do material seco (VITALI, 2013).

Na Figura 2 é mostrado o calor total acumulado ao longo 9 dias para pastas de cimento para três tipos de finura Blaine distintas: 381 J/g, 488 J/g e 583 J/g. Nota-se que há uma aceleração no processo de hidratação quando temos uma maior presença de finos, conseqüentemente, há uma maior liberação de calor nas idades iniciais (LI; YANG; XIE, 2015).

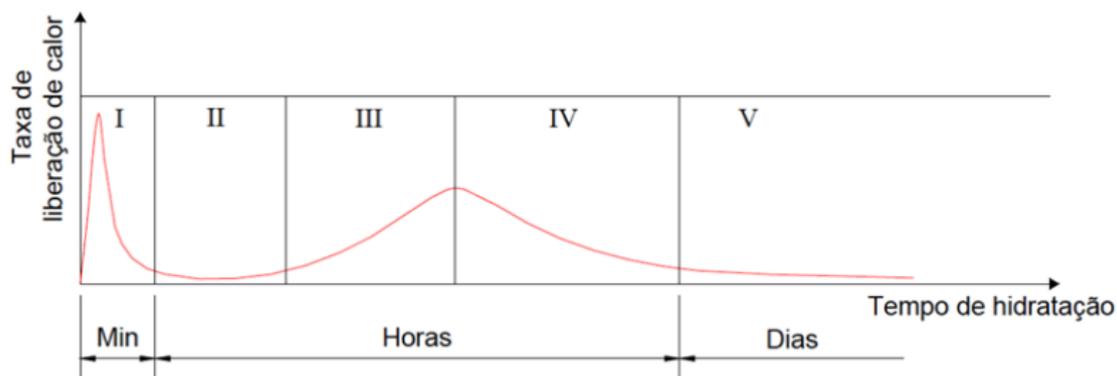
Figura 2 – Calor de Hidratação para diferentes finuras do cimento.



Fonte: Zhang (2017)

A cinética de hidratação (Figura 3) pode ser dividida em cinco estágios. No estágio I é onde ocorre o primeiro pico de hidratação devido a dissolução. O segundo estágio é denominado de período de indução (ou dormência) e possui uma baixa taxa de hidratação. O estágio III é o responsável pelo segundo pico exotérmico, e é nesse período que ocorre a pega do cimento. O estágio IV representa a desaceleração da curva de calor. Por fim, o quinto estágio é caracterizado por reações lentas (AGOSTINHO; BORGES; SILVA *et al*, 2020; apud MANZANO, 2016; LYRA, 2010).

Figura 3 – Gráfico da cinética de hidratação.



Fonte: Agostinho, Borges, Silva et al (2020)

2.3.4 Na porosidade

Inicialmente, é importante ressaltar que a porosidade nos materiais pode influenciar diretamente nas características mecânicas, principalmente quando presentes grandes quantidades de conexões entre os poros, gerando produtos de baixa resistência (CHEN; XU; WU, 2016; LIAN; ZHUGE; BEECHAM, 2011).

Com isso em vista, para tentar minimizar tais impactos, uma das estratégias é a adição de uma maior quantidade de material cimentício, já que uma maior quantidade de finos costuma ter um melhor preenchimento dos vazios, gerando produtos mais resistentes, devido ao melhor empacotamento das misturas cimentícias (LI; YANG; XIE, 2015).

Segundo Chen e Kwan (2012), os cimentos mais finos são capazes de atuar como fílers no preenchimento dos vazios, além de garantir uma melhor performance na hidratação.

Entretanto, conforme apontado por Zhang *et al* (2011), materiais muito finos também podem ser maléficos, devido a sua rápida hidratação, com menores produtos, deixando poucas partículas para a continuidade do processo de hidratação nas idades mais avançadas e dificultando a densificação da matriz cimentícia.

2.3.5 Na fluidez

Quando se avalia a fluidez, os principais parâmetros são a finura e a forma dos grãos. No caso da primeira, uma grande quantidade de finos reduz o espalhamento, devido a maior necessidade de água para recobrir os grãos, em função da maior área superficial (KWAN; WONG, 2008a). Porém, uma correta dosagem permite a melhoria na trabalhabilidade e redução na exsudação, conseqüentemente gerando uma melhoria operacional nos processos de produção (ANSARI; CHANG, 2020; NEVILLE, 2016).

No caso da utilização de finos em maior quantidade, com uma maior área de contato entre os grãos, é possível reduzir as distâncias entre partículas, aumentando a interação (DE MATOS *et al*, 2018). Com isso, possibilita melhoras no espalhamento e na reologia desses materiais (KWAN; WONG, 2008b). Tanto

para questões de viscosidade plástica, quanto para espalhamento, (LI; YANG; XIE, 2015), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Densidade de empacotamento e índices de vazios para diferentes taxas de substituição por cimentos superfinos.

Cimento	A	B	C
Viscosidade do plástico (Mpa*s)	1120	909	795
Método do espalhamento do tronco de cone (s)	65,3	39,7	28,6

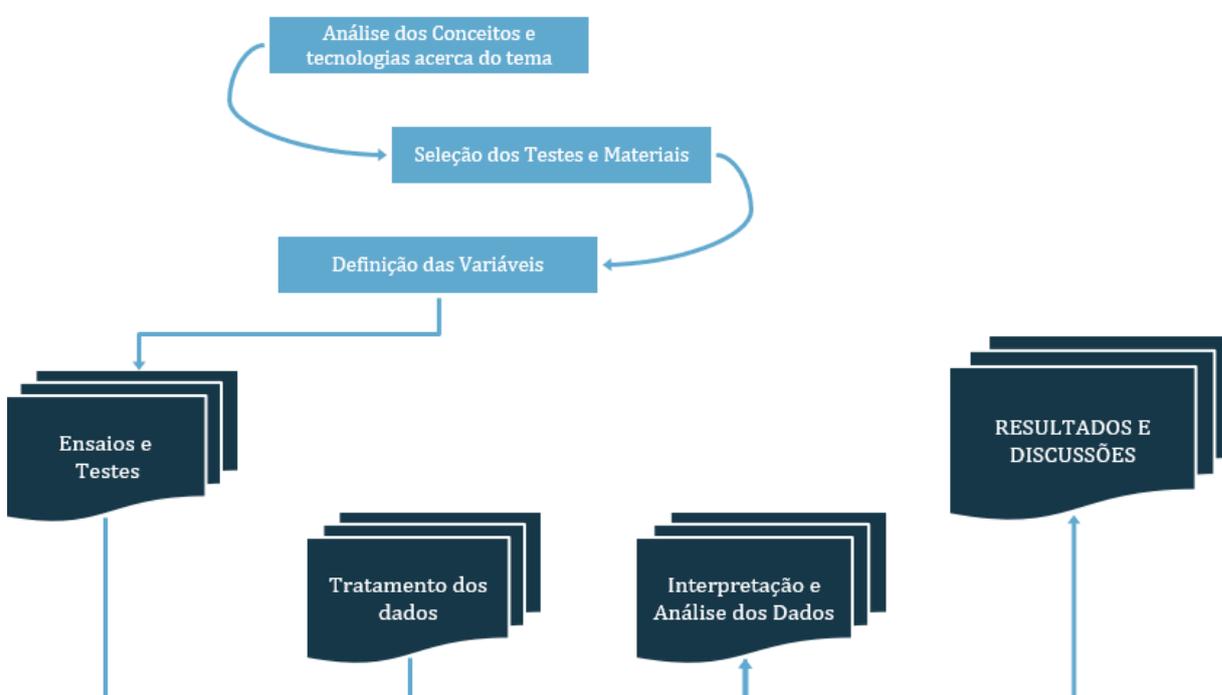
Fonte: Adaptado de Li, Yang e Xie (2015)

Além dessas características, como forma dos grãos e finura do material, a adequada gradação granulométrica, pode melhorar os aspectos de fluidez, diminuindo a resistência ao escoamento e a possibilidade de exsudação da mistura (NEHDI; MINDESS; AITCIN, 1998).

3. MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Inicialmente foi feita uma análise dos principais conceitos e tecnologias acerca do tema. Em seguida é abordado a seleção dos materiais que foram utilizados e a determinação dos processos como: moagem, ensaio de finura Blaine, ensaio de calorimetria e ensaio de resistência à compressão em argamassas. Por fim, foi feita a interpretação dos dados e das influências das variáveis definidas, desenvolvendo a elaboração do projeto final para a conclusão do curso, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Elaborado pela autora

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nessa pesquisa serão descritos nos itens a seguir.

3.1.1 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), este é um dos cimentos que possui menor teor de adições de minerais na sua composição. Como foi mostrado na Tabela 1 este cimento apresenta um limite de 90% - 100% de utilização de sulfatos de cálcio + clínquer, por tanto esse cimento se caracteriza por ter uma menor influência quanto aos estudos de cimento. Na

Tabela 3 tem-se as especificações físicas e químicas do cimento utilizado, fornecido pelo fabricante.

Tabela 3 – Especificações físicas e químicas do cimento CP V-ARI.

	Parâmetro	Alcançado	Especificação normativa	
Caracterização Física	Massa específica (g/cm ³)	3,16		
	Área específica Blaine (cm ² /g)	5046		
	Expansibilidade a quente	0	≤ 5 mm	
	Finura - Resíduos na peneira	#200 (%)	0,09	≤ 6,0 %
		#325 (%)	0,56	-
	Tempo de pega	Início (min)	155	≥ 60 min
		Fim (min)	200	≤ 600 min
	Resistencia à compressão	1	22,90	≥ 14,0 MPa
		3	36,00	≥ 24,0 MPa
		7	41,03	≥ 34,0 MPa
28			-	
Caracterização Química (%)	Perda ao fogo	4,42	≤ 6,5 %	
	Resíduo insolúvel	0,88	≤ 3,5 %	
	MgO		≤ 6,5 %	
	SO ₃	3,06	≤ 4,5 %	

Fonte: Dados fornecedor Mizu engenharia

3.1.2 Agregado miúdo

A areia normalizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) foi utilizada nas argamassas para o ensaio de resistência à compressão, que tinham o propósito de encontrar o aditivo promotor de moagem mais eficiente. O material é fornecido pelo IPT em embalagens de 25 kg, separadas nas seguintes frações granulométricas: grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100) como mostrado nas Figuras 5, 6, 7 e 8.

Figura 5 – Areia Normal Brasileira - Grossa (#16).



Figura 6 – Areia Normal Brasileira - Média Grossa (#30).



Figura 7 – Areia Normal Brasileira - Média Fina (#50).



Figura 8 – Areia Normal Brasileira - Fina (#100).



Fonte: Autora 2022

Já o agregado miúdo utilizado para as demais composições de argamassas dosadas deste trabalho foi uma areia quartzosa de cava, conforme pode ser observado na Figura 9. O referido agregado foi caracterizado conforme a ABNT NBR 248 (2003). A metodologia utilizada está descrita no item 3.2.1.2.

Figura 9 – Areia utilizada para ensaios.



Fonte: Autora 2022

O ensaio de caracterização da areia foi realizado por meio do peneiramento e os dados obtidos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados obtidos pelo ensaio de peneiramento.

Abertura das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (g) 300			
	b) massa inicial seca (g) 300			
	Massa retida (g)		Massa retida (%)	
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%
6,3	0,0	0,0	0,0%	0,0%
4,75	0,0	0,0	0,0%	0,0%
2,36	0,0	0,0	0,0%	0,0%
1,18	3,4	3,1	1,1%	1,0%
0,6	32,8	33,5	10,9%	11,2%
0,3	146,5	145,9	48,8%	48,6%
0,15	113,8	114,9	37,9%	38,3%
Fundo	3,5	2,6	1,2%	0,9%
Mtotal	300	300		

Fonte: Autora 2022

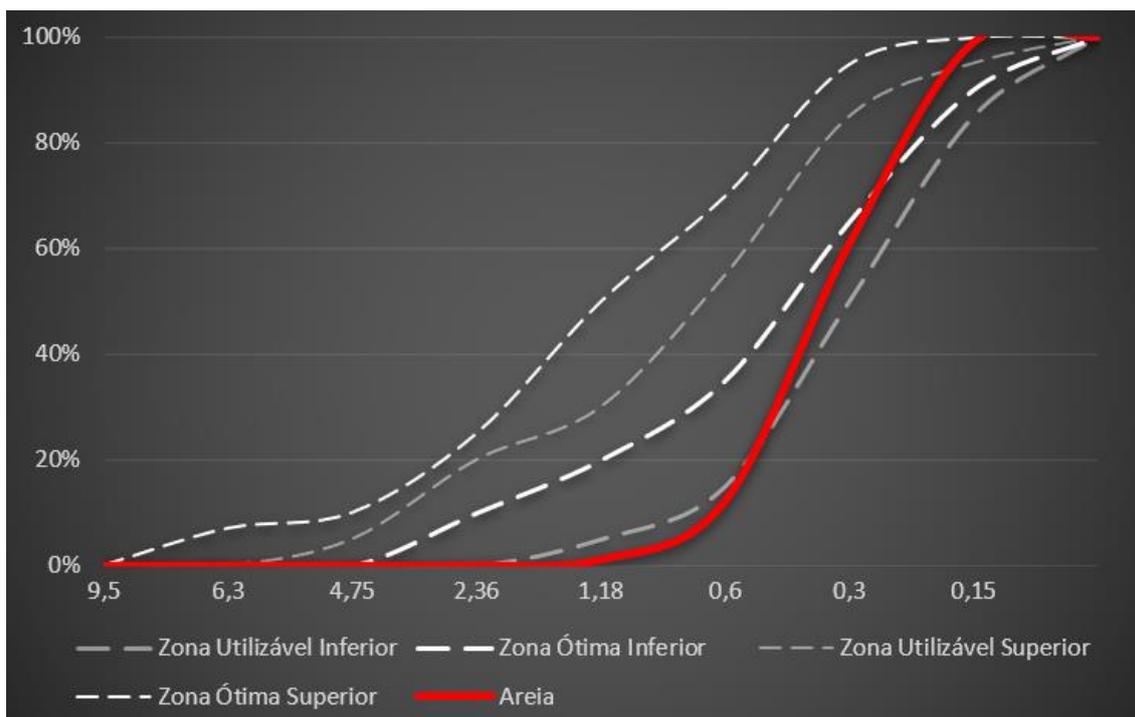
O ensaio de peneiramento realizado produziu os dados da Tabela 5 e a curva granulométrica mostrada na Figura 10. Com isso, foi possível encontrar a dimensão máxima característica (DMC) para essa areia que foi de 1,18 mm e seu módulo de finura (MF) foi de 1,73, que é característico da zona utilizável inferior segundo a norma ABNT NBR 7211 (2019). A areia utilizada tem massa específica de 2,65 g/cm³.

Tabela 5 – Resultados das amostras e limites da distribuição granulométrica.

Abertura das peneiras (mm)	Vr Massa retida Variações ± 4%	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada (%)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
				Limites inferiores		Limites superiores	
				Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
9,5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6,3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%
4,75	0%	0%	0%	0%	0%	5%	10%
2,36	0%	0%	0%	0%	10%	20%	25%
1,18	0%	1%	1%	5%	20%	30%	50%
0,6	0%	11%	12%	15%	35%	55%	70%
0,3	0%	49%	61%	50%	65%	85%	95%
0,15	0%	38%	99%	85%	90%	95%	100%
Fundo	0%	1%	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Autora 2022

Figura 10 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autora 2022

3.1.3 Aditivos

3.1.3.1 Aditivos promotores de moagem

Os aditivos auxiliares de moagem utilizados são fornecidos em cooperação com uma empresa de cimento, dosados de acordo com as recomendações do fabricante, e quantidades estimadas de aditivos com base em sua composição química usando instruções na literatura. Sabe-se que há variações entre os tipos e quantidades de aditivos, por exemplo, Zhang *et al* (2017) utilizaram um aditivo de micro moagem rico em SiO₂ na proporção de 9:1 (cimento; aditivo). Outro exemplo é o aditivo utilizado por Toprak *et al* (2020), utilizando trietanolamina como componente principal, e utilizando diferentes proporções de auxiliares de moagem (250-450g) por tonelada de cimento a ser moído.

A dosagem recomendada é de 0,06% a 0,08% sobre a massa do cimento, esses aditivos interferem na solubilidade do cimento e por consequência na produção de hidratos.

Para cada um deles adotou-se as denominações de AD02 (PJ 336/02), AD04 (PJ 336/04) e AD06 (PJ 336/06), esses aditivos podem ser visualizados na Figura 11 a seguir.

Figura 11 – Aditivos promotores de moagem.

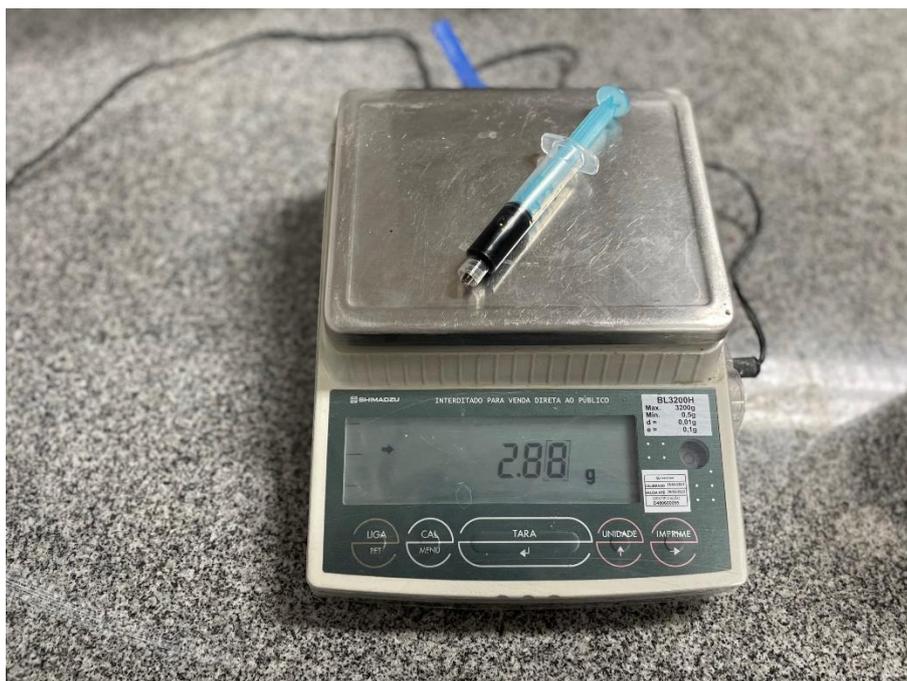


Fonte: Autora 2022

3.1.3.2 Aditivos plastificantes

O aditivo utilizado no preparo das argamassas foi um polifuncional para concreto com significativa capacidade de redução de água, com aplicações múltiplas e isento de cloretos. A Figura 12 mostra do aditivo dentro da seringa, sendo preparado para uso. Uma primeira amostra foi feita com a dosagem de 0,2% sobre a massa de cimento, o que não demonstrou melhoras significativas após análise visual da argamassa, então adotou-se o valor de 0,4%.

Figura 12 – Aditivo superplastificante.



Fonte: Autora 2022

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.2.1 Etapa I

3.2.1.1 Determinação do aditivo promotor de moagem

Para a determinação do aditivo que melhor se adequaria a moagem, o CP V-ARI foi moído durante 3 horas para cada um dos aditivos auxiliares de moagem testados. O teor de aditivo auxiliar de moagem foi o mesmo para os diferentes aditivos, 0,08%, em relação a massa de cimento, conforme recomendação do fabricante. Para moer o cimento, foi utilizado um moinho de bolas com carga abrasiva de 50 kg. A massa de cimento foi de 5 kg para todos os lotes testados. Na Figura 13 é mostrado o moinho de bolas utilizado na pesquisa.

Figura 13 – Moinho de bolas.



Fonte: Autora 2022

Em seguida o material passou pelo ensaio de finura Blaine, que é normatizado pela ABNT NBR 16372 (2015). O objetivo do ensaio é encontrar a finura de um material em pó por meio do tempo necessário para que determinada quantidade de ar atravesse uma camada do material compactado. A quantidade de material utilizada no ensaio é determinada de acordo com a Equação 1.

$$m_1 = (1 - \varepsilon) * \rho * V \quad (1)$$

Onde,

m_1 é a massa do material, em g;

ε é a porosidade da camada, escolhida por tentativas;

ρ é a massa específica do material, em (g/cm³);

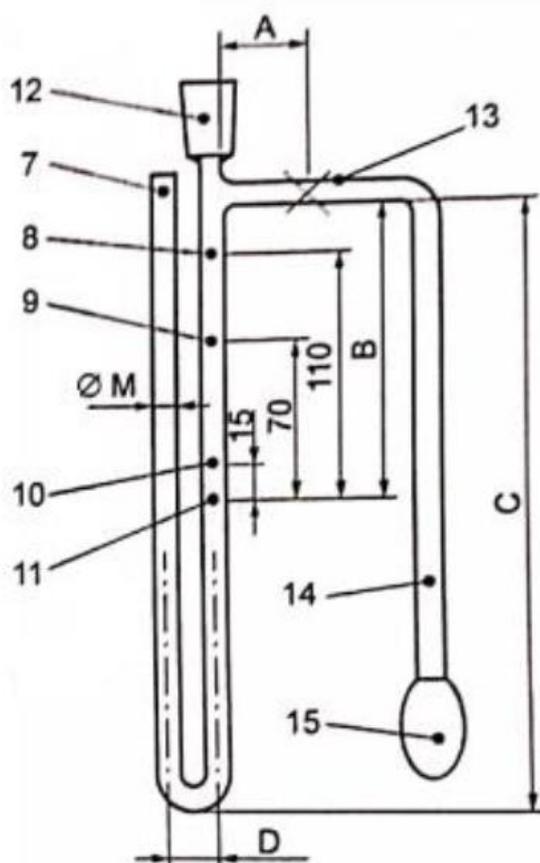
V é o volume da camada compactada previamente determinado, em cm³.

A massa m_1 calculada deve ser inserida em uma célula cilíndrica e compactada por um êmbolo. Nesse instante, deve-se observar se a compactação acontece de maneira muito fácil, pois nesse caso será necessário variar o valor de ε para

que se aumente a massa m_1 . Caso não seja possível compactar totalmente a massa inserida, será necessário diminuir a massa utilizada.

Em seguida, deve-se inserir a célula em um manômetro e abrir o seu registro. O líquido manométrico começa a fluir e registra-se o intervalo de tempo (t) utilizado para que ele passe da posição 9 para a posição 10, como esquematizado na Figura 14.

Figura 14 – Permeabilímetro Blaine.



Fonte: ABNT NBR 16372 (2015)

Por fim, calcula-se a permeabilidade por meio da Equação 2.

$$S = \frac{K \cdot \sqrt{\varepsilon^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \sqrt{0,1\eta}} \quad (2)$$

Onde,

S é a superfície específica, em cm^2/g ;

K é a constante do aparelho;

η é a viscosidade do ar de acordo com a temperatura, retirado de uma tabela especificada na norma.

A areia utilizada nessa etapa, para o ensaio de resistência à compressão de corpos cilíndricos, foi a do IPT, esse material é fornecido conforme descrito no item 3.1.2. A produção e fornecimento deste material são atribuições do IPT, estabelecido na ABNT NBR 7214 (2015) - Areia normal para ensaio de cimento. A Figura 15 mostra as diferentes granulometrias desse material fornecido pelo IPT.

Figura 15 – Areia normalizada.



Fonte: Autora 2022

Em seguida foram moldados 12 corpos de provas para a medição da resistência à compressão, sendo 3 para cada amostra de cimento, para, dessa forma, avaliar o ganho de resistência com o aditivo escolhido.

Para a pesagem dos materiais foi utilizado o traço de referência apresentado na Tabela 6 para a moldagem dos corpos de prova, com erro admissível de $\pm 0,2$ g. As Figuras 16 e 17 apresenta os materiais, cimento e areia normatizada, após a pesagem.

Tabela 6 – Porcionamento para moldagem de 3 corpos de prova.

Peso (g)					
Água	Cimento	Areia grossa	Areia média grossa	Areia média fina	Areia fina
187,49	390,61	292,96	292,96	292,96	292,96

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7215 (2019)

Figura 16 – Areia normatizada após pesagem.



Fonte: Autora 2022

Figura 17 – Cimentos separados após pesagem.



Fonte: Autora 2022

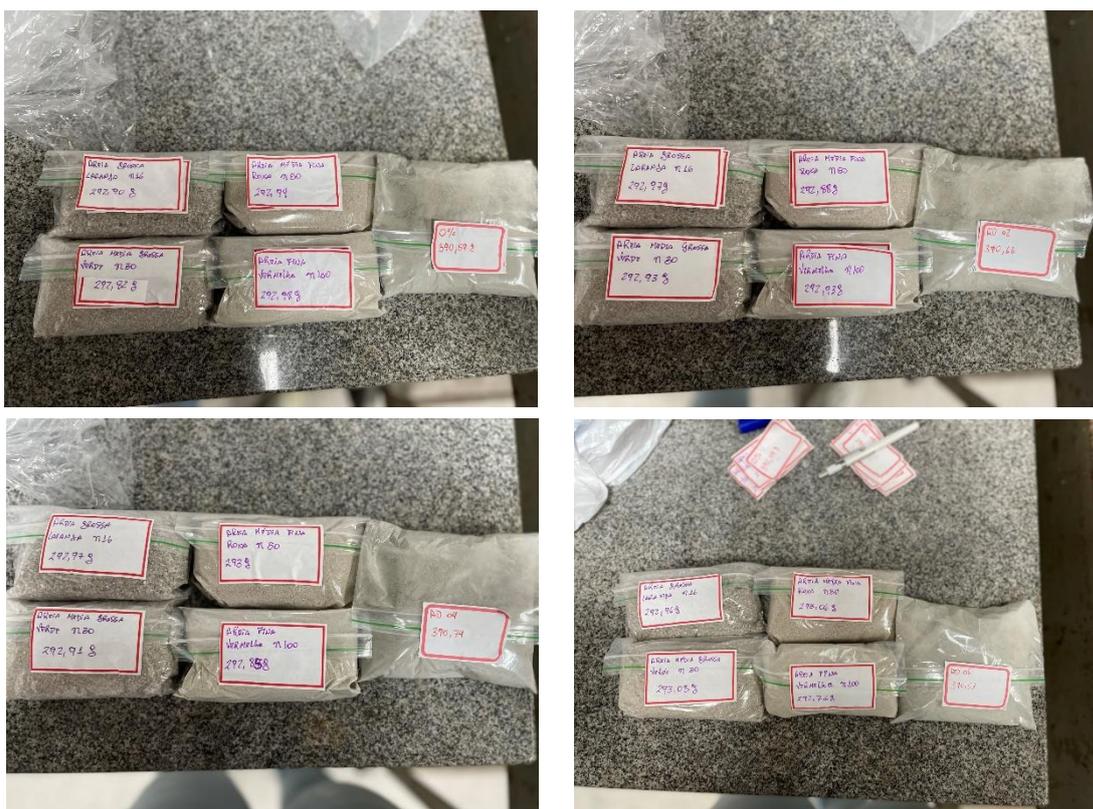
Após a pesagem obteve-se as seguintes quantidades conforme mostra a Tabela 7 e estes valores são também ilustrados na Figura 18 pelos materiais que foram utilizados.

Tabela 7 – Quantidade de insumos das argamassas para um teor de 0,08% de aditivo promotor de moagem.

	Referencial (0%)	AD02	AD04	AD06
Cimento (g)	390,59	390,66	390,74	390,53
Areia Grossa (g)	292,90	292,97	292,97	292,96
Areia Média Grossa (g)	292,82	292,93	292,91	293,08
Areia Média Fina (g)	292,94	292,88	293,00	293,06
Areia Fina (g)	292,98	292,93	292,85	292,76
Água (g)	187,46	187,52	187,50	187,49

Fonte: Autora 2022

Figura 18 – Conjunto de materiais após pesagem.



Fonte: Autora 2022

Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizada a norma ABNT NBR 7215 (2019). Na produção da argamassa, primeiro foi adicionado toda a água e assim iniciou-se a mistura a baixa velocidade adicionando o cimento, não paralisando o misturador (durante o intervalo de 30s), após isso deve-se adicionar a areia, misturada previamente, durante os 30s seguintes.

Mudar para a velocidade alta, misturando-se os materiais nesta velocidade durante 30s. Após este tempo, foi desligado o misturador durante 90s, dividido em 30s (limpeza) e 60s (repouso absoluto). Imediatamente após este intervalo, ligou-se o misturador na velocidade alta, por mais 60s.

Os moldes, como mostra a Figura 19, já untados com desmoldantes ficaram próximos a argamassadeira para a moldagem dos corpos de prova. A moldagem foi dividida em 4 camadas, de acordo com a altura do molde (aproximadamente 2,5 cm cada camada) e a cada camada aplicou-se 30 golpes com soquete normal. Após o último adensamento deixou-se um leve excesso na parte superior

para posterior arrasamento do corpo de prova. A argamassa fica no molde até o período inicial de cura.

Figura 19 – Moldes para corpo de prova.



Fonte: Autora 2022

Após a moldagem, os corpos de prova foram levados a câmara úmida, ainda nos moldes, por 24 horas, protegendo a face superior, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 – Corpos de prova com face superior protegida.



Fonte: Autora 2022

Após 24h deve-se desmoldar os corpos de prova, identificando-os e botando em local submerso, como demonstrado na Figura 21, separando-os no tanque de cura (água não corrente) saturados de cal, por lote, até o momento do rompimento (7 dias).

Figura 21 – Corpos de provas desmoldados e identificados, submersos no tanque de cura.



Fonte: Autora 2022

Antes de romper os corpos de prova foi realizado o capeamento deles utilizando uma retificadora. Esse procedimento é necessário pois a parte superior dos corpos de prova fica desnivelada após a moldagem, o que não faria com que a carga aplicada fosse uniformemente distribuída pela superfície. Na Figura 22 é possível observar que o corpo de prova está rigorosamente centrado em relação ao eixo de carregamento, assim como descrito na norma ABNT NBR 7215 (2019).

Figura 22 – Corpo de prova retificado, pronto para o ensaio a resistência.



Fonte: Autora 2022

Os valores obtidos para as resistências, que serão analisados capítulo 4, são mostrados nas Tabelas 8, 9, 10 e 11. Os valores estão apresentados respectivamente para o cimento CP V-ARI moído 3h com teores de 0% e 0,08% do AD02, AD04 e AD06.

Tabela 8 – Dados para corpos de prova com 0%.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	Dmedio (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP1	50,09	50,12	5,01	96,57	19,72	8600	42,74
CP2	50,13	50,13	5,01	96,78	19,74	9000	44,69
CP3	50,16	50,11	5,01	97,08	19,74	8600	42,69

Fonte: Autora 2022

Tabela 9 – Dados para corpos de prova com AD02.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	Dmedio (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP4	50,13	50,06	5,01	96,57	19,71	9030	44,90
CP5	50,13	50,08	5,01	96,78	19,72	8550	42,50
CP6	50,10	50,06	5,01	97,08	19,70	9230	45,92

Fonte: Autora 2022

Tabela 10 – Dados para corpos de prova com AD04.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{medio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP7	50,03	50,04	5,00	96,72	19,66	8540	42,56
CP8	50,13	50,20	5,02	97,09	19,76	7490	37,14
CP9	49,93	49,85	4,99	98,21	19,55	6190	31,03

Fonte: Autora 2022

Tabela 11 – Dados para corpos de prova com AD06.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{medio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP10	50,09	49,99	5,00	96,85	19,67	9350	46,59
CP11	50,16	50,42	5,03	97,08	19,86	9000	44,40
CP12	50,14	50,40	5,03	96,21	19,85	9100	44,93

Fonte: Autora 2022

3.2.1.2 Caracterização do agregado miúdo

Como já explicado anteriormente no item 3.2.1.1, a areia utilizada para a determinação do aditivo promotor de moagem foi a do IPT. Para a análise do trabalho foi utilizada outro tipo de areia, caracterizada conforme a ABNT NBR NM 248 (2003).

O agregado passou por uma caracterização física. Sua composição granulométrica é obtida de acordo com o recomendado por norma. O agregado seco em estufa deve passar por um peneiramento, a partir do qual será possível informar as porcentagens passantes e retidas em cada uma das malhas das peneiras utilizadas. Para sua utilização o agregado deve apresentar porcentagens de material retido nas peneiras dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2019).

3.2.2 Etapa II

Produção das argamassas e a avaliação das suas propriedades.

3.2.2.1 Composição das argamassas para avaliação de suas propriedades

Para a produção de 48 corpos de provas, foi utilizado 5 kg de cimento convencional CP V-ARI sem processo de moagem e 15 kg com 3 tipos de granulometria diferentes, sendo 5 kg moído com 1h, 5 kg moído em 2h e 5 kg

moído 2h com o aditivo escolhido após a análise que será feita na Etapa I do capítulo 4. Nota-se, portanto, que o programa experimental se propôs a comparar o efeito da finura do cimento com ou sem aditivo auxiliador de moagem.

O porcionamento dos insumos utilizado para referência dos corpos de prova é descrito pela Tabela 12.

Tabela 12 – Porcionamento para argamassa.

Peso (g)			
AREIA	CIMENTO	ÁGUA	ADITIVO PLASTIFICANTE
2161,57	720,52	345,85	2,88

Fonte: Autora 2022

3.2.2.2 Produção das argamassas para avaliação de suas propriedades

O porcionamento dos insumos para as argamassas contendo o cimento convencional (CC), utilizado como referência, cimento moído durante 1h (M1), cimento moído durante 2h (M2) e o cimento moído durante 2h com adição de 0,08% de teor de aditivo promotor de moagem (MD) com rompimento aos 7 dias de idade são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Porcionamento das argamassas para rompimento aos 7 dias de idade.

	CC	M1	M2	MD
Cimento (g)	720,57	720,50	720,48	720,50
Areia Grossa (g)	2161,58	2161,55	2161,57	2161,57
Água (g)	345,85	345,85	345,84	345,86
Aditivo plastificante (g)	2,88	2,88	2,88	2,88

Fonte: Autora 2022

Da mesma forma, as composições para serem ensaiadas à compressão aos 28 dias, são mostradas na Tabela 14. Devido ao volume de material necessário para moldagem de seis dos corpos de prova por idade, foi necessário rodar as argamassas em dias distintos, por isso é reportado essas pequenas variações nas composições das argamassas, mas que não comprometem o entendimento deste trabalho.

Tabela 14 – Porcionamento das argamassas para rompimento aos 7 dias de idade.

	CC	M1	M2	MD
Cimento (g)	720,40	720,60	720,58	720,56
Areia Grossa (g)	2161,56	2161,57	2161,56	2161,64
Água (g)	345,85	345,86	345,85	345,86
Aditivo plastificante (g)	2,88	2,88	2,88	2,88

Fonte: Autora 2022

Para a produção da argamassa, foi utilizado o mesmo processo descrito na Etapa I para a padronização dos corpos de prova. O misturador mecânico que foi utilizado está registrado na Figura 23, consiste em uma cuba de aço inoxidável e de uma pá de metal, que gira em torno de si mesma e em torno do eixo da cuba, esse misturador funciona com duas velocidades.

Figura 23 – Argamassadeira.



Fonte: Autora 2022

Para todas as composições foi possível calcular o teor de ar incorporado utilizando como referência a ABNT NBR 13278 (2005). Para isso foi utilizado o recipiente mostrado na Figura 24, por padronização foi medida a massa do recipiente em gramas e depois a massa de cada argamassa para cálculo da densidade da argamassa.

Figura 24 – Recipiente.



Fonte: Autora 2022

O recipiente possui uma massa de 387,5g e volume de 429cm³. Pela Equação 3 calculou-se a densidade da argamassa, no estado fresco, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³).

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} * 1000 \quad (3)$$

Onde,

d é a densidade de massa da argamassa, em kg/m³;

m_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em g;

m_c é a massa do recipiente cilíndrico contendo argamassa, em g;

V_r é o volume do recipiente, em cm³.

Para cálculo do teor de ar incorporado é utilizado a Equação 4, onde relaciona a densidade calculada da argamassa com a sua densidade teórica.

$$A = 100 * \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (4)$$

Onde,

A é o teor de ar incorporado, em %;

d é a densidade de massa da argamassa, em g/cm³;

d_t é a densidade teórica em massa da argamassa, sem vazios, em g/cm³.

3.2.2.3 Determinação do índice de consistência

Para a determinação do índice de consistência foi utilizado o anexo A da norma ABNT NBR 7215 (2019), no qual é definido que o aparelho utilizado deve ser constituído por uma mesa horizontal lisa e plana de metal. O molde rígido troncônico e o soquete devem ser de metal não corrosivo conforme Figura 25.

Figura 25 – Mesa para índice de consistência.



Fonte: Autora 2022

A moldagem deve ser feita imediatamente após a preparação da argamassa, colocar bem ao centro da mesa o molde, com a sua base maior apoiada na mesa, a argamassa deve ser colocada na forma em três camadas de mesma altura e com soquete deve-se aplicar 15, 10 e 5 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos, respectivamente, nas primeira, segunda e terceira camadas. Após isso, remover o material que ultrapassar a borda e alisar o topo com a régua, tomando o cuidado de limpar a mesa em volta do molde. Terminado o

enchimento, retirar imediatamente a forma, levantando-a verticalmente, com cuidado assim como é demonstrado na Figura 26.

Figura 26 – Tronco de cone moldado.



Fonte: Autora 2022

Em seguida mover a manivela do aparelho, fazendo com que a mesa caia 30 vezes em aproximadamente 30s para provocar o abatimento do tronco de cone de argamassa como pode-se observar na Figura 27.

Figura 27 – Abatimento do tronco de cone de argamassa.



Fonte: Autora 2022

A medição do diâmetro é feita com o auxílio de um paquímetro, conforme demonstrada na Figura 28, após o abatimento. O índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais.

Figura 28 – Medição do diâmetro com paquímetro.



Fonte: Autora 2022

3.2.2.4 Ensaio de calorimetria

A medição da evolução de calor foi realizada utilizando uma câmara climática que pode ser observada na Figura 29 para a deposição dos corpos de prova, estes ligados a um fio termopar tipo K ligado a um sistema de aquisição de dados do modelo ADS2002IP da série ADS2K, e tudo isso ligado a um computador.

Figura 29 – Equipamentos para ensaio de calorimetria.



Fonte: Autora 2022

As amostras, no estado fresco, recém misturadas eram lançadas em um recipiente cilíndrico, de EPS como mostra a Figura 30. O termopar era mantido na metade da altura da amostra. O copo cilíndrico forrado com uma sacola plástica e após a penetração do fio essa sacola era amarrada e o copo fechado com uma tampa de EPS. Em seguida foi passado uma fita adesiva para que evitasse o fluxo de ar.

Os valores de temperatura foram coletados a cada 1 segundo, em um período total de 72 horas e seus resultados estão apresentados por meio de gráficos e tabelas, no capítulo 4, para melhor entendimento e análise. Os tempos de início de pega foram determinados pelo método das Frações Diretas, proposto por Weakley (2010), onde ele considera que a pega ocorre quando o aumento da temperatura atinge o valor correspondente a 21% do acréscimo total.

Seguindo o procedimento utilizado para avaliar a cinética de hidratação, alguns parâmetros térmicos foram determinados para melhor caracterizar o efeito da finura. O procedimento experimental utilizado permite a determinação de uma série de parâmetros que ajudarão a comparar os efeitos sobre a argamassa, por meio de medições de temperatura ao longo do tempo de ensaio.

Figura 30 – Amostras prontas para medição.



Fonte: Autora 2022

3.2.3 Etapa III

3.2.3.1 Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos

Para a determinação da resistência à compressão foi utilizada a norma ABNT NBR 7215 (2019). Após a moldagem dos corpos de prova eles foram colocados em câmara úmida, onde permanecem por 24h. Terminado esse período inicial de cura, os corpos de prova desmoldados, como demonstra a Figura 31, identificados e colocados em um tanque de cura (Figura 32) com água (não corrente) saturada de cal, onde permanecem até o momento da ruptura.

Figura 31 – Corpos de prova desmoldados e identificados após 24h.



Fonte: Autora 2022

Figura 32 – Tanque de cura com água não corrente, saturada de cal.



Fonte: Autora 2022

Para que a força aplicada seja igualmente distribuída é utilizado uma retificadora, como visto nas Figuras 33 e 34, com as bases dos corpos de prova ficando niveladas conforme Figuras 35 e 36.

Figura 33 – Retificadora.



Fonte: Autora 2022

Figura 34 – Processo de retifica dos corpos de prova.



Fonte: Autora 2022

Figura 35 – Corpos de provas com superfícies niveladas.



Fonte: Autora 2022

Figura 36 – Corpos de provas com superfícies niveladas.



Fonte: Autora 2022

Após a retifica dos corpos de prova, utilizando um paquímetro com escala em milímetros e resolução de no mínimo 0,1 mm é feita a medida dos diâmetros mostrado na Figura 37, são feitas duas medidas de forma que o diâmetro médio

seja a soma e divisão destes. Também é feita a medida da altura como mostra a Figura 38.

Figura 37 – Medição de diâmetro utilizando paquímetro.



Fonte: Autora 2022

Figura 38 – Medição de altura utilizando paquímetro.



Fonte: Autora 2022

A máquina para o ensaio de resistência à compressão, mostrada na Figura 39, deve ser capaz de aplicar força de maneira contínua à uma velocidade constante de carregamento, ser calibrada de acordo com a ABNT NBR ISO 7500-1 e ser classificada como Classe 1 ou melhor. Deve possuir prato superior capaz de se alinhar livremente no momento do contato com o corpo de prova e possuir um dispositivo indicador, construído de forma que o valor indicado no momento da ruptura permaneça depois da máquina ter sido descarregada.

Figura 39 – Prensa para ensaio de ruptura.



Fonte: Autora 2022

O corpo de prova deve ser inserido diretamente sobre o prato inferior da prensa, de maneira que fique rigorosamente centrado em relação ao eixo de carregamento conforme Figura 40.

Figura 40 – Corpo de prova pronto para ensaio de resistência a compressão.



Fonte: Autora 2022

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios e análises que compõem o programa experimental do presente trabalho. Os resultados estão divididos em etapas: Começando pela escolha do aditivo promotor de moagem, em seguida a análise nos estados fresco e endurecido. Essas etapas são separadas de acordo com o tipo de teste. Os resultados de cada ensaio são apresentados em texto, tabelas e gráficos, com categorias e discussões para facilitar a compreensão da interpretação do comportamento dos dados.

4.1 ETAPA I

4.1.1 Determinação do aditivo promotor de moagem

Nessa etapa são apresentados os resultados obtidos para a determinação do aditivo que foi adotado em função do ganho de resistência à compressão por meio dos ensaios em argamassa e da análise da finura do cimento moído pelo método de Blaine.

Para isso foi moído um total de 20 kg de cimento durante 3 horas (como explicado na Etapa I do capítulo 3). Durante o processo de moagem foram retiradas amostras do cimento em tempos determinados a fim de se analisar a finura.

A Tabela 15 apresenta os valores encontrados para os ensaios de finura e massa específica em diferentes níveis de moagem e aditivos. A metodologia utilizada para os ensaios está descrita no item 3.2.1.1.

Tabela 15 – Valores de finura de Blaine e massa específica.

TEMPO (h)	CC		AD06 0,08%		AD04 0,08%	
	Finura Blaine (cm ² /g)	Massa Específica (g/cm ³)	Finura Blaine (cm ² /g)	Massa Específica (g/cm ³)	Finura Blaine (cm ² /g)	Massa Específica (g/cm ³)
0,0	4991,93	3,16	-		-	
0,5	-	3,16	5698,70		5525,50	
1,0	6436,43	3,12	6463,64		5899,35	
2,0	6803,52	3,09	7532,36	3,07	7428,60	3,06
3,0	6781,71	3,08	7210,49	3,07	7095,93	3,07

Fonte: Ensaio realizado por Luís Lampert 2022

Observou-se que o aditivo promove um aumento significativo na finura do cimento com 2 horas de moagem. Nota-se que após 2 horas o ensaio apresentou resultados não confiáveis.

Após isso foi utilizada a norma ABNT NBR 7215 (2019) para a moldagem de 12 corpos de provas, estes foram elaborados com argamassa composta de uma parte de cimento (moído conforme citado anteriormente) e três de areia normalizada (utilizada areia IPT), em massa, e com relação água cimento de 0,48, sendo 3 corpos de prova para um dos aditivos bem como o cimento convencional moído, que serviu de parâmetro para a escolha do aditivo.

Com isso os moldes para os corpos de prova foram limpos e untados com desmoldantes em toda a sua superfície interna, utilizando a metodologia explicada na Etapa I do capítulo 3. Após sua compactação foram separados e identificados como é possível observá-los na Figura 41.

Figura 41 – Corpos de provas compactados.



Fonte: Autora 2022

A Tabela 16 apresenta os valores das médias encontradas para a resistência à compressão de corpos cilíndricos das argamassas produzidas para a escolha do

aditivo, e a Figura 42 mostra dois troncos de cones formados após o ensaio de resistência a compressão dos corpos cilíndricos.

Tabela 16 – Resultado dos ensaios de resistência.

Resistência aos 7 dias em Mpa	0%	AD02	AD04	AD06
	43,37	44,43	36,91	45,31
Desvio padrão	0,93	1,44	5,88	0,93

Fonte: Autora 2022

Figura 42 – Ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Autora 2022

Como o objetivo do trabalho é a análise da finura, foi escolhido o que melhor apresentava a característica de aumento na finura e ganho de resistência, e após o ensaio de resistência conclui-se que seria melhor adotar o AD06 para ser utilizado nos resultados subsequentes.

4.2 ETAPA II

4.2.1 Avaliação das propriedades das argamassas produzidas.

Para a produção dos 48 corpos de prova, foi utilizado o traço descrito no item 3.2.2.2 conforme as Tabelas 13 e 14. Por meio de análise do ar incorporado na mistura e massa específica é possível avaliar o material. Utilizando a

metodologia explicada no item 3.2.2.2 obteve-se os seguintes resultados para a densidade da argamassa no estado fresco demonstrados na Tabela 17.

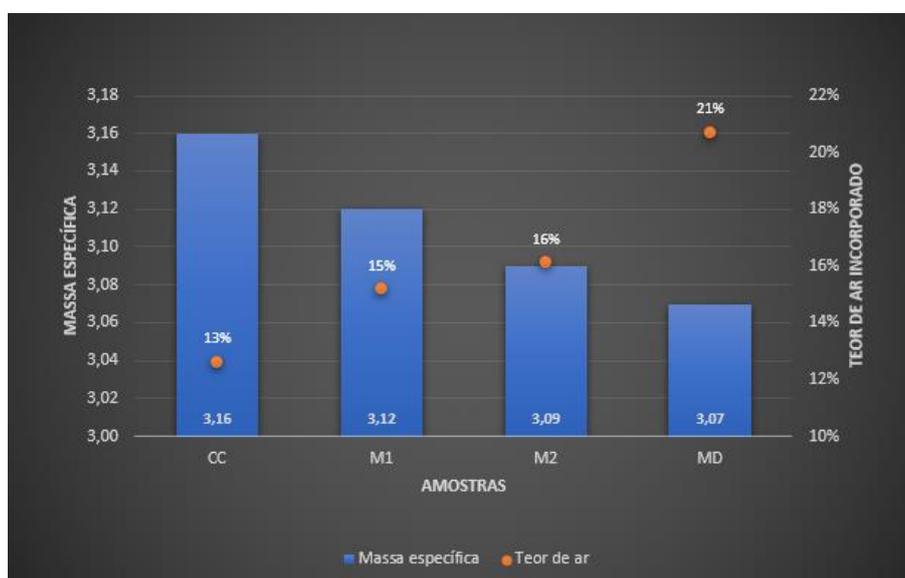
Tabela 17 – Densidade das argamassas.

Densidade de massa da argamassa g/cm ³	
CC	2,03
M1	1,96
M2	1,94
MD	1,83

Fonte: Autora 2022

A Figura 43 apresenta um gráfico correlacionando massa específica dos cimentos com teor de ar incorporado para cada mistura de argamassa. Pode-se observar que quanto menor a massa específica dos cimentos, maior o teor de ar incorporado. Isso ocorre, possivelmente, em função da composição do aditivo utilizado na moagem, e por conta das argamassas com maior teor de finos terem ficado mais secas por conta da demanda de água.

Figura 43 – Correlação entre massa específica dos cimentos utilizados e teor de ar incorporado



Fonte: Autora 2022

Segundo Beningfield (1988), se as argamassas receberem teores de ar incorporado entre 20% e 25%, torna-se perceptível uma redução em suas resistências. Para as porcentagens de 15% e 20%, a maioria do tipo de ar incorporado leva a uma pequena redução das propriedades no estado

endurecido, sendo assim recomenda-se um máximo de 20% para o teor de ar incorporado.

4.2.2 Determinação do índice de consistência

Os valores de índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas dos dois diâmetros ortogonais. A Tabela 18 mostra os valores encontrados para cada amostra.

Tabela 18 – Índice de consistência

Índice de Consistência				
Diâmetro (mm)	Cimento Convencional			Cimento com Aditivo
	0h	1h	2h	2h
D1	153	142	136	137
D2	152	144	138	134
Média	152,5	143	137	135,5

Fonte: Autora 2022

Pode-se observar que de acordo com o aumento da finura, os valores no índice de consistência da mistura foram diminuindo. O resultado obtido está em consonância com os estudos apresentados por Kwan e Wong (2008a) pois, com uma maior a quantidade de finos, há uma redução do espalhamento, devido a maior necessidade de água no recobrimento dos grãos em função da maior área específica do cimento e, conseqüentemente, resultando na diminuição da trabalhabilidade das misturas com mais finos.

É importante ressaltar que apesar da redução da trabalhabilidade nas argamassas com maior quantidade de finos, não houve uma perda de água significativa, que pôde ser denotado nas Figuras 44 e 45.

Figura 44 – Argamassa com CC após ensaio de consistência.



Fonte: Autora 2022

Figura 45 – Argamassa com MD após ensaio de consistência.



Fonte: Autora 2022

Além disso, nas amostras com cimento moído 2h, com e sem aditivo, a diferença obtida é ainda menos significativa.

4.2.3 Ensaio de calorimetria

Buscando padronizar os ensaios, o experimento de calorimetria utilizou do mesmo traço para a produção das argamassas conforme item 3.2.2.1 na Tabela 12. Assim sendo, a Tabela 19 apresenta os valores, em massa, das argamassas, como pode ser observado nas Figuras 46, 47, 48 e 49. Pretendia-se padronizar os valores de argamassa em cada recipiente, pelo menos em ordem de grandeza.

Tabela 19 – Massa das argamassas para ensaio de calorimetria

Peso (g)							
CC	1161,41	M1	1161,42	M2	1161,40	MD	1161,43

Fonte: Autora 2022

Figura 46 – Argamassa de referência (CC) no recipiente.



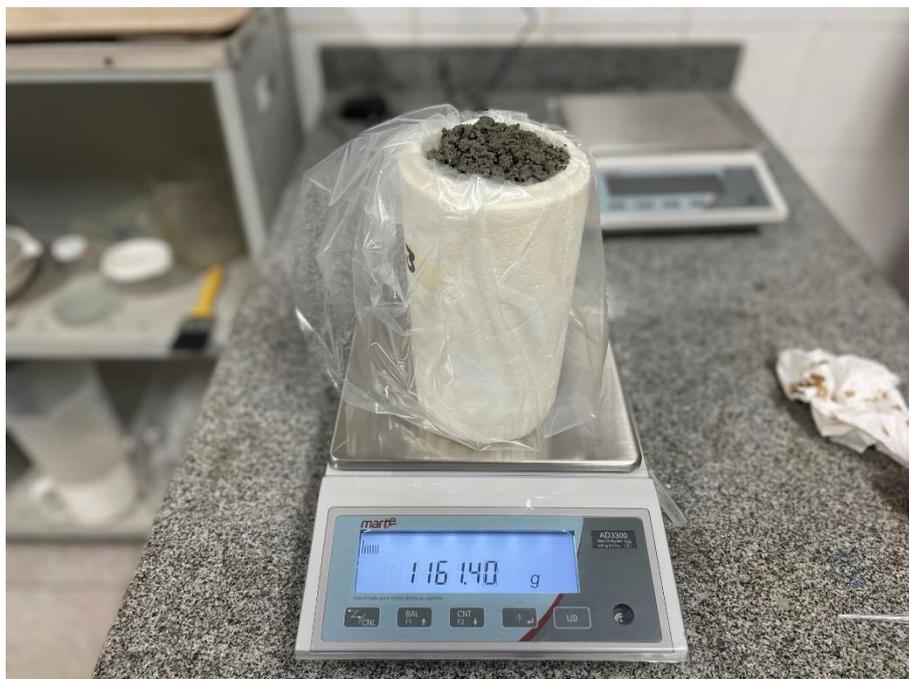
Fonte: Autora 2022

Figura 47 – Argamassa com M1.



Fonte: Autora 2022

Figura 48– Argamassa com M2.



Fonte: Autora 2022

Figura 49 – Argamassa com MD.

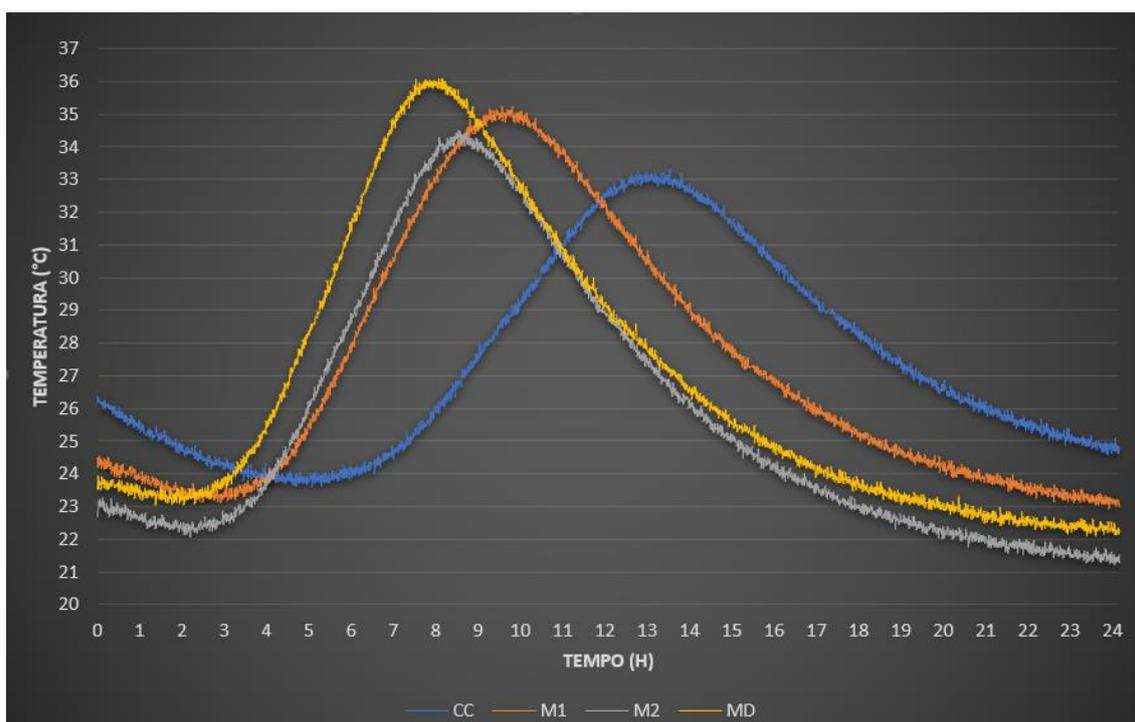


Fonte: Autora 2022

Pelo método experimental descrito no item 3.2.2.4 o dispositivo de medição de calor de hidratação resultante faz o uso de fios termopar para medir a temperatura da amostra no calorímetro durante o teste. Portanto, a curva de evolução da temperatura ao longo do tempo de teste pode ser determinada.

A Figura 50 mostra as curvas de evolução da temperatura para cada traço.

Figura 50 – Ensaio de calorimetria.



Fonte: Autora 2022

O tempo desde o contato inicial do cimento com a água até o início do ensaio de calor foi entre 10 e 20 minutos. Sendo assim, o ensaio não possibilitou a determinação do primeiro e maior pico de calor de hidratação (calor de dissolução) que ocorre por volta de 10 minutos (TAYLOR, 1997).

É possível verificar, através da análise gráfica da Figura 50, que os traços que continham mais finos em sua composição, tiveram sua reação química com a água mais acelerada. Tal cenário já era esperado, afinal, quanto maior a quantidade de finos, maior sua superfície específica e, conseqüentemente, maior a velocidade das reações com a água.

Para cálculo da capacidade térmica, os valores dos calores específicos dos materiais constituintes da argamassa, como o do CP, areia e água potável, serão adotados conforme Tekes (2000). Os valores estão mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores adotados para cálculo do calor específico.

Calor específico considerado (kj/kg.K)		
Cimento	Areia	Água
0,84	0,8	4,186

Fonte: Adaptado Tekes (2000)

Segundo Andrade (2008) a capacidade térmica pode ser calculada por meio do procedimento estabelecido pelo RILEM TC 119-TCE1, que relaciona a massa total da argamassa com seus materiais utilizados, pela Equação 5.

$$C_s = m_s \sum (g_i * c_i) \quad (5)$$

Onde,

C_s é a capacidade térmica da amostra, em kJ/K;

m_s é a massa da amostra, em kg;

g_i é a proporção relativa do constituinte na massa da amostra, em kg/kg;

c_i é o calor específico do constituinte, em kJ/K.

Como dito anteriormente, procurou padronizar os valores em massa das amostras, portanto sua capacidade térmica não demonstra variações como demonstra a Tabela 21.

Tabela 21 – Capacidade térmica das amostras.

Capacidade térmica das amostras				
	CC	M1	M2	MD
Massa	1,16	1,16	1,16	1,16
Cs	3,24	3,24	3,24	3,24

Fonte: Autora 2022

Com a evolução da temperatura ao longo do tempo, pode-se calcular o desenvolvimento do calor gerado na amostra tomando-se por base a sua capacidade térmica calculada. Utilizamos a Equações 6 para calcular o Q_i que é o calor gerado ao longo do tempo.

$$Q_i = \frac{C_s * \Delta T_i}{m_c} \quad (6)$$

Em que,

Q_i é a quantidade de calor gerado no tempo i, em J/g;

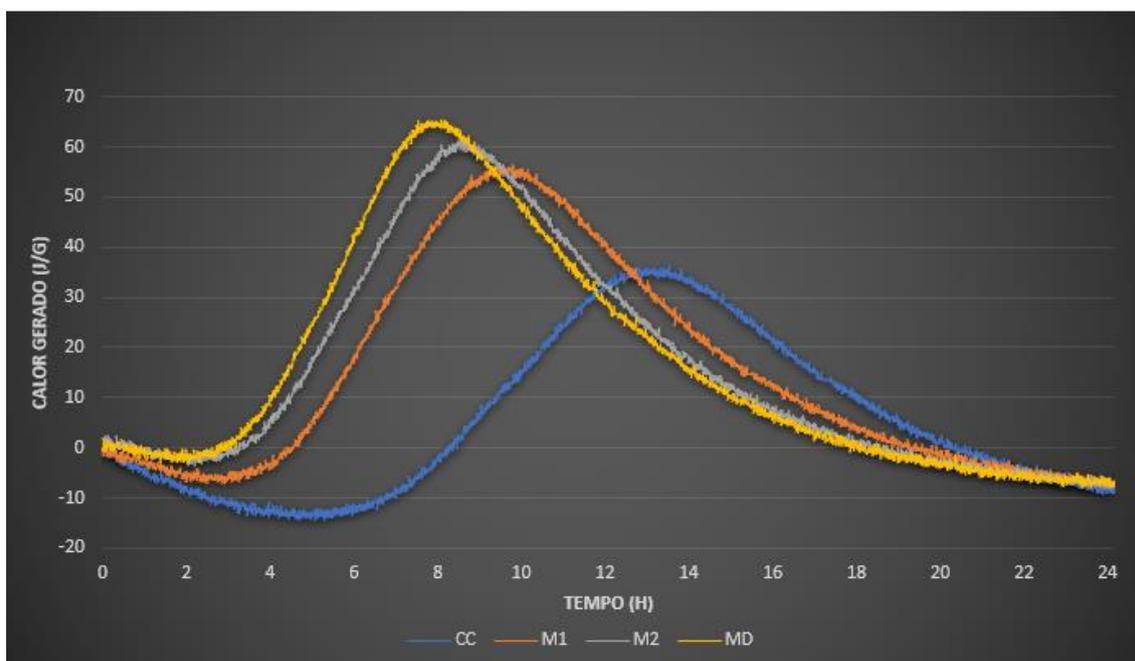
m_c é a massa de cimento na amostra, em g;

C_s é a capacidade térmica da amostra, em J/K;

ΔT_i é a variação da temperatura no tempo i , em °C.

A partir da Equação 6 conseguimos elaborar o gráfico apresentado na Figura 51 do calor gerado para um intervalo de tempo de 24 horas.

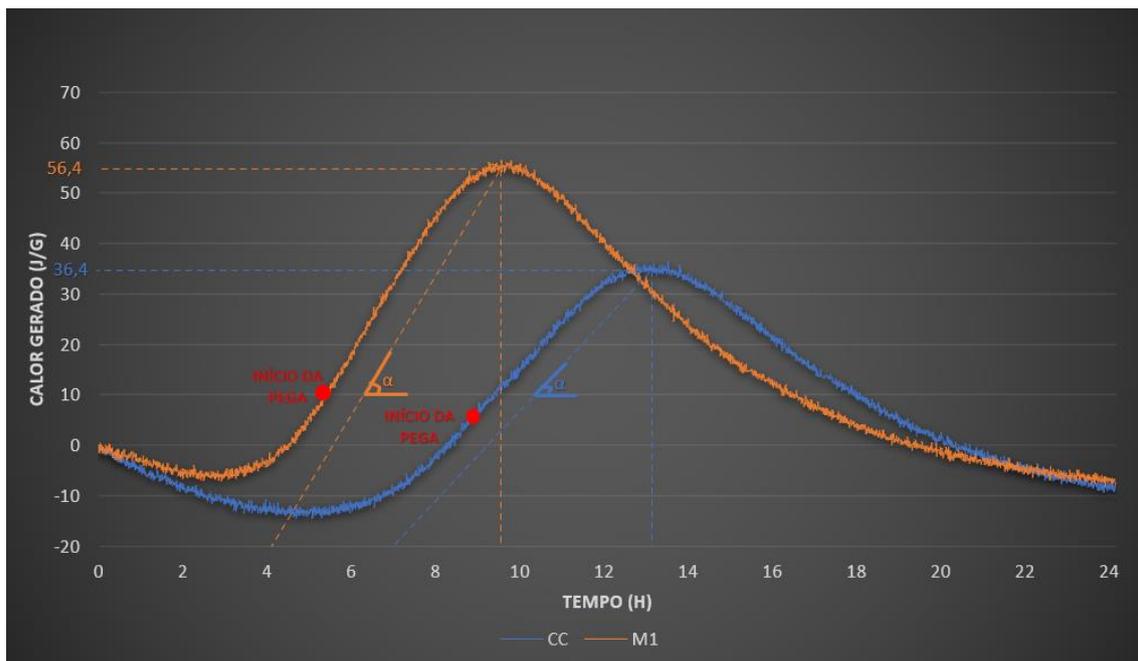
Figura 51 – Calor gerado ao longo do tempo.



Fonte: Autora 2022

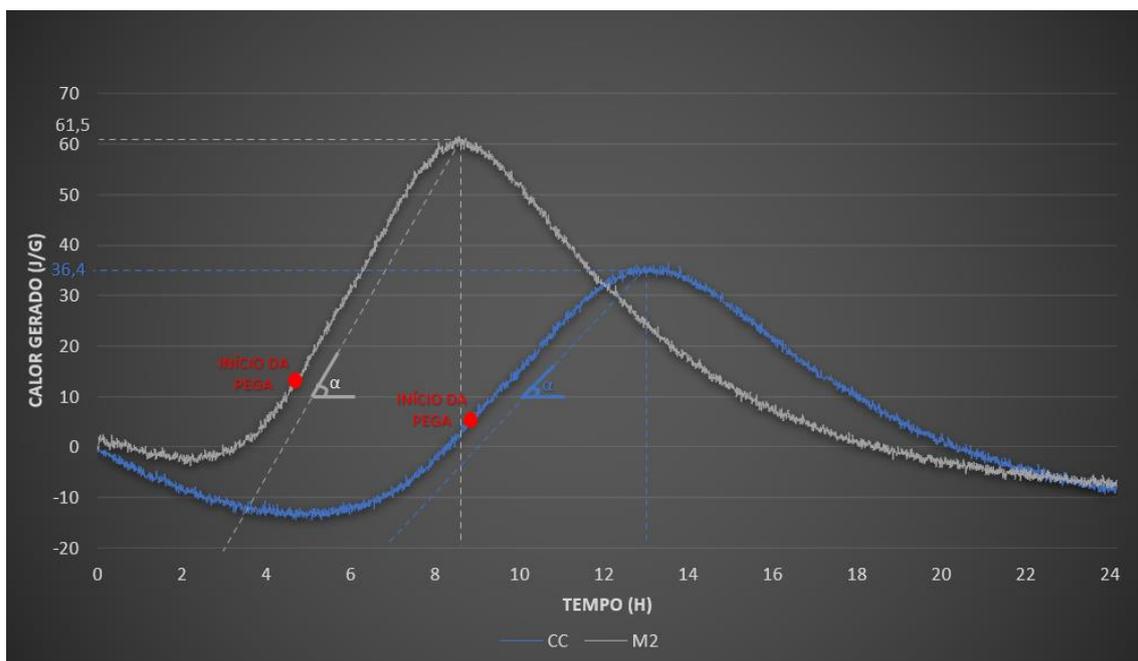
A partir da análise gráfica das curvas de cinética de hidratação apresentada na Figura 51, foram calculados alguns parâmetros como taxa de aceleração, quantidade de calor no pico de hidratação e tempo de pico. As taxas de aceleração foram calculadas a partir dos gráficos das Figura 52, 53 e 54.

Figura 52 – Calor gerado – CC x M1.



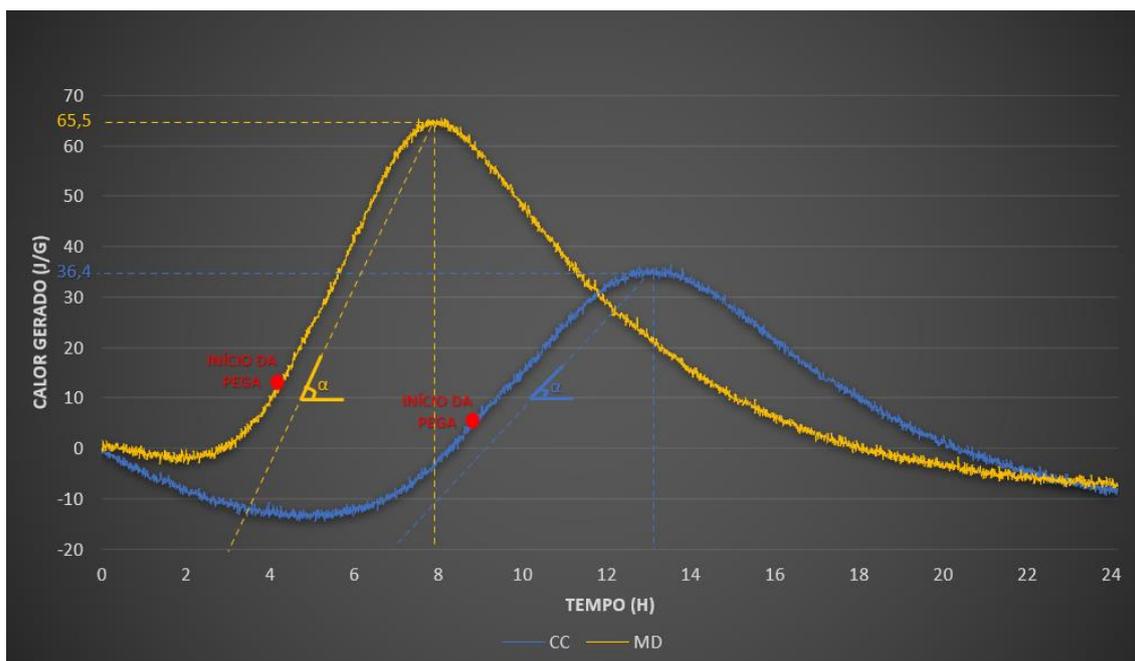
Fonte: Autora 2022

Figura 53 – Calor gerado – CC x M2.



Fonte: Autora 2022

Figura 54 – Calor gerado – CC x MD.



Fonte: Autora 2022

A partir dos gráficos foram traçadas retas paralelas ao trecho de crescimento e assim pôde-se determinar as taxas de aceleração no trecho ascendente da curva. Os tempos de início de pega foram determinados por meio do método das Frações Diretas (WEAKLEY, 2010).

Os resultados obtidos pela análise gráfica estão apresentados na Tabela 22 e graficamente na Figura 55.

Tabela 22 – Resultados calorimétricos obtidos pela análise gráfica.

AMOSTRA	PICO DE HIDRATAÇÃO (J/g)	TEMPO DO PICO DE HIDRATAÇÃO (h)	TAXA DE ACELERAÇÃO (tg α)	TEMPO DE INÍCIO DE PEGA
CC	36,40	13,2	9,1	09h03min
M1	56,40	9,6	13,6	05h37min
M2	61,50	8,6	14,6	04h42min
MD	65,50	8,0	17,1	04h18min

Fonte: Autora 2022

Figura 55 – Análise dos picos de Hidratação.

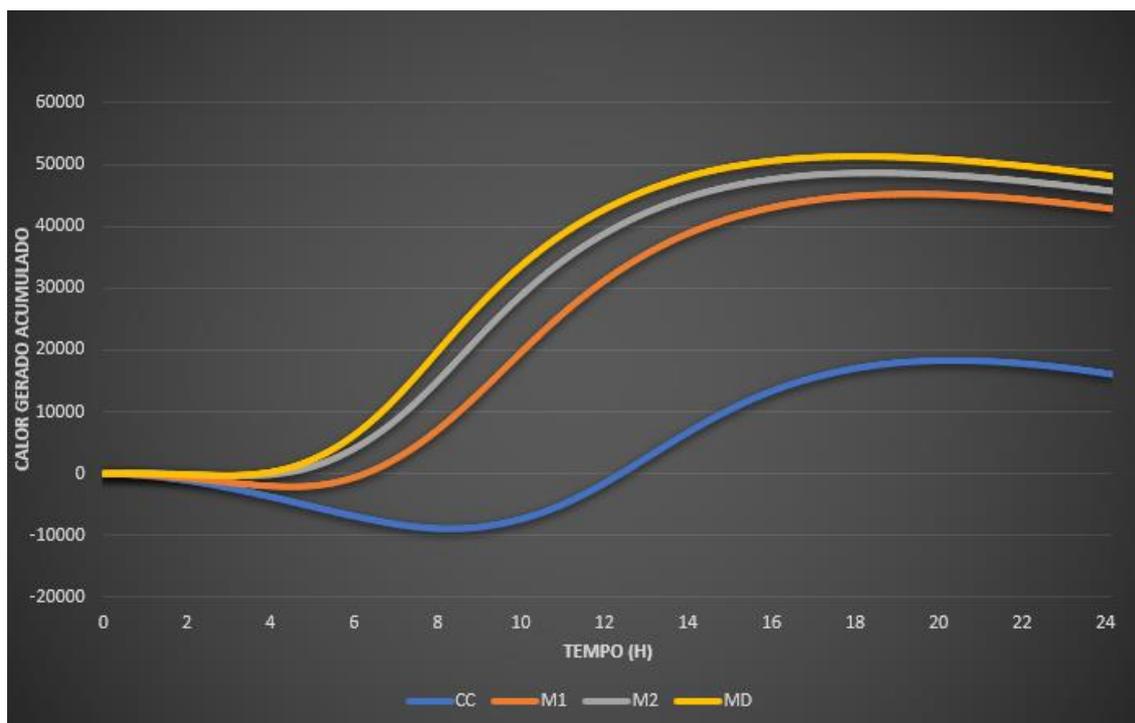


Fonte: Autora 2022

A partir da análise dos dados obtidos, podemos observar que o teor de finos tem grande influência no comportamento das curvas de hidratação, tendo em vista que houve uma antecipação considerável nas reações de hidratação, e conseqüentemente no tempo de início de pega. De fato, e conforme Mehta e Monteiro (2006) e Li, Yang e Xie (2015), nota-se que há uma aceleração no processo de hidratação, quando se tem mais finos, e conseqüentemente há uma maior liberação de calor nas idades iniciais. Além disso, quando compara-se o CC com o MD, tem-se uma redução de 4 horas e 45 minutos no início do tempo de pega.

A Figura 56 apresenta a curva de calor total gerado ao longo do tempo do ensaio de calorimetria. Pode-se observar que além do pico de hidratação e taxa de aceleração, em relação a quantidade total de calor gerado no ensaio, a amostra MD também obteve maior liberação de calor.

Figura 56 – Calor total acumulado ao longo do tempo.



Fonte: Autora 2022

Partindo da hipótese de que haveria alteração na cinética das reações de hidratação do CP nas argamassas com a variação de sua finura, é importante verificar a influência no tempo decorrido, desde o lançamento do ensaio até atingir o maior evento térmico, expresso pelo pico de calor gerado em relação ao tempo de moagem e o teor de aditivo.

4.3 ETAPA III

4.3.1 Determinação de resistência à compressão dos corpos de prova

Nessa etapa será feita a análise dos corpos de prova em relação a sua resistência a compressão.

Para os corpos de provas, ensaiados aos 7 e aos 28 dias, obteve-se os seguintes resultados, mostrados nas Tabelas 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30.

Tabela 23 – Corpos de prova de referência (CC) para ensaio aos 7 dias.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	Dmédio (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP1	50,14	50,25	5,02	96,81	19,79	6270	31,05
CP2	50,17	50,09	5,01	96,16	19,74	5930	29,44

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{médio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP3	50,29	50,22	5,03	93,80	19,84	6140	30,34
CP4	50,15	50,07	5,01	96,36	19,72	6550	32,55
CP5*	50,31	50,21	5,03	96,71	19,84	5850	28,90
CP6	50,15	50,12	5,01	95,73	19,74	6480	32,17

*Em conformidade com a norma ABNT NBR 7215 (2019) foi calculado o desvio relativo máximo. E, portanto, foi necessário descartar os resultados obtidos para o CP5.

Fonte: Autora 2022

Tabela 24 – Corpos de prova de referência (CC) para ensaio aos 28 dias.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{médio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP7	50,28	50,65	5,05	95,95	20,00	7650	37,48
CP8	50,00	50,19	5,01	96,65	19,71	7650	38,04
CP9*	50,06	50,14	5,01	98,40	19,71	6800	33,80
CP10	50,09	50,39	5,02	97,02	19,82	7800	38,56
CP11	50,04	50,12	5,01	97,75	19,70	7200	35,82
CP12	50,22	50,23	5,02	98,17	19,81	7750	38,34

*Em conformidade com a norma ABNT NBR 7215 (2019) foi calculado o desvio relativo máximo. E, portanto, foi necessário descartar os resultados obtidos para o CP9.

Fonte: Autora 2022

Tabela 25 – Corpos de prova M1 para ensaio aos 7 dias.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{médio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP13	49,88	49,92	4,99	96,81	19,56	6560	32,87
CP14	50,06	50,19	5,01	95,72	19,73	6720	33,37
CP15	50,18	50,02	5,01	95,55	19,71	6620	32,91
CP16	50,07	49,85	5,00	94,96	19,60	6810	34,04
CP17	50,05	49,92	5,00	95,42	19,62	6830	34,11
CP18	49,99	50	5,00	95,85	19,63	6530	32,60

Fonte: Autora 2022

Tabela 26 – Corpos de prova M1 para ensaio aos 28 dias.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{médio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP19*	49,99	49,83	4,99	96,60	19,56	9050	45,33
CP20	50,20	50,20	5,02	94,83	19,79	8300	41,10
CP21*	50,13	40,04	4,51	95,50	15,96	7700	47,27
CP22	49,91	49,96	4,99	95,93	19,58	8250	41,28
CP23	50,45	49,86	5,02	96,61	19,76	8000	39,68
CP24	49,86	49,80	4,98	97,14	19,50	8050	40,45

*Em conformidade com a norma ABNT NBR 7215 (2019) foi calculado o desvio relativo máximo. E, portanto, foi necessário descartar os resultados obtidos para o CP19 e CP21.

Fonte: Autora 2022

Tabela 27 – Corpos de prova M2 para ensaio aos 7 dias.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{médio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP25	50,05	50,23	5,01	95,47	19,75	7040	34,94
CP26	50,05	50,18	5,01	96,92	19,73	6750	33,54
CP27*	50,35	50,35	5,04	96,70	19,91	6080	29,93
CP28	50,21	50,08	5,01	95,40	19,75	7020	34,84
CP29	50,35	50,24	5,03	95,41	19,87	6780	33,44
CP30	50,15	50,09	5,01	95,01	19,73	6860	34,08

*Em conformidade com a norma ABNT NBR 7215 (2019) foi calculado o desvio relativo máximo. E, portanto, foi necessário descartar os resultados obtidos para o CP27.

Fonte: Autora 2022

Tabela 28 – Corpos de prova M2 para ensaio aos 28 dias.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{médio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP31	50,03	50,17	5,01	93,83	19,71	8250	41,01
CP32	50,02	49,88	5,00	97,14	19,60	8750	43,76
CP33*	50,01	50,08	5,00	96,14	19,67	7150	35,62
CP34*	50,05	49,91	5,00	98,26	19,62	7800	38,96
CP35	49,80	49,99	4,99	95,76	19,55	8500	42,60
CP36*	50,13	50,24	5,02	96,95	19,78	6900	34,19

*Em conformidade com a norma ABNT NBR 7215 (2019) foi calculado o desvio relativo máximo. E, portanto, foi necessário descartar os resultados obtidos para o CP33, CP34 e CP36.

Fonte: Autora 2022

Tabela 29 – Corpos de prova MD para ensaio aos 7 dias.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{medio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP37	49,95	49,94	4,99	95,24	19,59	7100	35,51
CP38	50,28	50,15	5,02	96,52	19,80	7800	38,60
CP39	50,03	49,93	5,00	96,91	19,62	7230	36,11
CP40	50,00	50,23	5,01	95,78	19,73	7580	37,66
CP41*	50,02	59,99	5,50	96,39	23,76	7740	31,92
CP42	49,80	50,06	4,99	95,91	19,58	6900	34,54

*Em conformidade com a norma ABNT NBR 7215 (2019) foi calculado o desvio relativo máximo. E, portanto, foi necessário descartar os resultados obtidos para o CP41.

Fonte: Autora 2022

Tabela 30 – Corpos de prova MD para ensaio aos 28 dias.

Corpo de prova	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{medio} (cm)	ALTURA (mm)	ÁREA (cm ²)	FORÇA (kgf)	RESISTÊNCIA (MPa)
CP43	50,24	50,11	5,02	96,54	19,77	8600	42,62
CP44	50,15	50,38	5,03	96,87	19,84	8050	39,76
CP45	50,10	50,03	5,01	95,62	19,69	8800	43,81
CP46	50,20	50,02	5,01	95,89	19,72	8750	43,48
CP47	49,97	49,93	5,00	96,75	19,60	9150	45,76
CP48	50,00	49,89	4,99	97,45	19,59	8950	44,77

*Em conformidade com a norma ABNT NBR 7215 (2019) foi calculado o desvio relativo máximo. E, portanto, foi necessário descartar os resultados obtidos para o CP41.

Fonte: Autora 2022

A Tabela 31 apresenta os valores das médias encontradas para as resistências das argamassas. Nota-se que o desvio padrão foi pequeno, o que simboliza que as médias representam bem as resistências obtidas nas amostras.

Tabela 31 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão

Traço	CC	M1	M2	MD
Resistencia aos 7 dias (Mpa)	31,11	33,32	34,17	36,48
Desvio padrão	1,15	0,58	0,63	1,46
Resistencia aos 28 dias (Mpa)	37,65	42,04	42,46	42,91
Desvio padrão	0,98	1,55	1,13	1,60

Fonte: Autora 2022

Como pode-se observar, houve um ganho significativo na resistência das argamassas, em função da finura do cimento utilizado, principalmente aos 7 dias.

A resistência aos 28 dias, por sua vez, apresentou um ganho de resistência menor. Isso se dá, principalmente, por se tratar do uso do CP V-ARI, que tem como característica uma alta resistência inicial. Esses resultados estão em concordância com o que apresentou Li, Yang e Xie (2015), sendo a finura mais determinante na resistência nas primeiras idades.

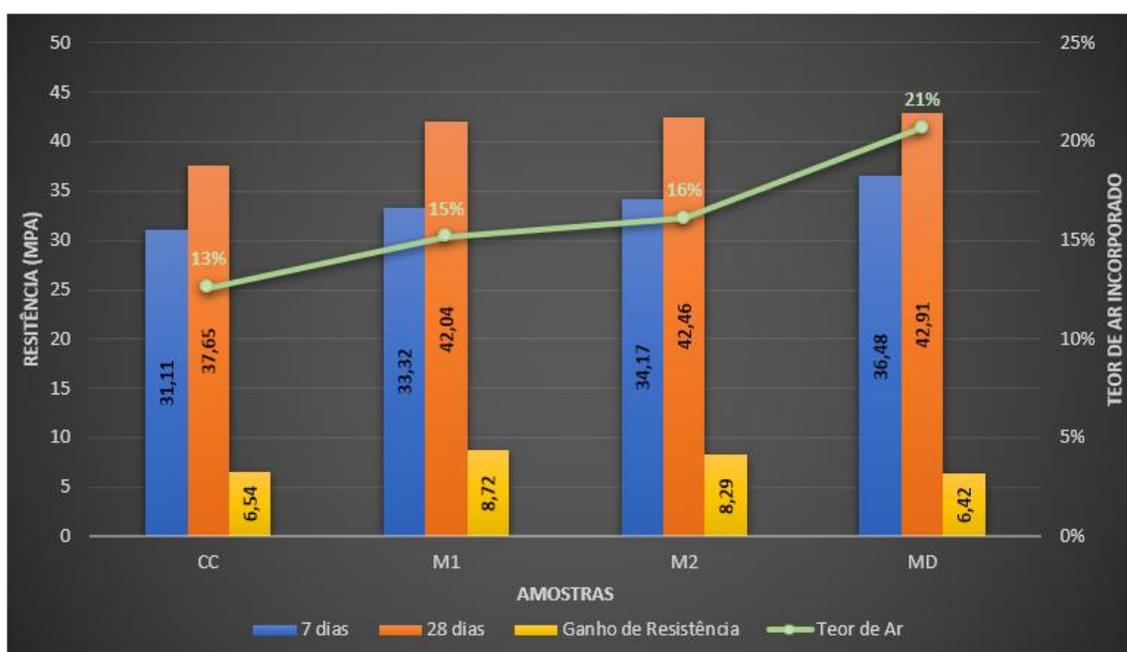
É observado por Vitali (2013) e verificado na presente pesquisa que, em função da hidratação das partículas menores ocorrerem de maneira mais acelerada, ocorre um rearranjo nos grãos, e dependendo dessa nova distribuição, alguns grãos maiores podem não se hidratar, resultando em um material mais poroso. Observa-se também que mesmo que a presença de vazios para misturas com cimento que continham um maior teor de finos aumentou, a resistência a compressão na argamassa na verdade não sofreu danos, já que isso poderia acarretar uma diminuição em sua resistência, conforme aponta os estudos realizados por Chen, Xu e Wu (2016), e Lian, Zhuge e Beecham (2011).

Destaca-se o ganho na resistência da argamassa com cimento moído durante 1 hora, em relação aos seus 7 e 28 dias de hidratação. Seu aumento foi de aproximadamente 26% enquanto no traço de referência o ganho de resistência foi de aproximadamente 21%. Apesar do traço com aditivo promotor de moagem não ter apresentado um ganho tão significativo entre 7 e 28 dias, foi o que apresentou maiores resistências finais entre as amostras estudadas.

Como dito anteriormente o recomendado nas argamassas é o valor máximo de 20% no teor de ar incorporado, pois dessa forma não há uma significativa mudança em sua resistência. O que, de maneira geral, pode ser observado pelo ensaio, visto que a diferença no ganho da resistência entre 7 e 28 dias foi menor, cerca de 17%, no cimento moído com aditivo, visto que este era o que continha o maior teor de ar, conseqüentemente maior índice de vazios.

As amostras com maior teor de ar incorporado foram as que apresentaram menor ganho de resistência entre as idades de 7 e 28 dias, conforme pode-se observar na Figura 57.

Figura 57 – Influência do teor de ar incorporado no ganho de resistência mecânica aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autora 2022

4.4 INFLUÊNCIA DO ADITIVO

Foi possível a análise do aditivo promotor de moagem nas misturas das argamassas e sua influência nos efeitos do calor de hidratação. Os aditivos têm por objetivo o aumento em volume da produção e na melhoria das características de desempenho.

Por meio dos resultados obtidos do calor de hidratação e das resistências à compressão conclui-se que o aditivo ajudou a hidratar mais rápido e, como dito anteriormente, foi o que apresentou uma maior resistência a compressão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões e considerações finais dos estudos realizados.

5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da finura nas propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido. No estado fresco foi avaliado as variações do teor de ar incorporado às misturas, a massa específica, índice de consistência e as características calorimétricas das argamassas. Por fim, no estado endurecido, foram avaliados os ganhos de resistência das argamassas nos diferentes níveis de moagem estudados.

Em relação ao teor de ar incorporado, foi possível notar que o aumento na quantidade de finos do cimento, acarretou um aumento na quantidade de vazios presente nas misturas, e em função disso, observou-se uma redução nas densidades das argamassas, o que era de se esperar.

A trabalhabilidade das argamassas também é afetada diretamente pela finura do cimento. Isso foi determinado através do ensaio de consistência, onde foi possível denotar que uma maior quantidade de finos implica uma redução na trabalhabilidade das argamassas, pois há um aumento na superfície específica do cimento, havendo uma maior absorção de água das misturas.

As características calorimétricas são bastante afetadas pela finura do cimento, e isso foi verificado no presente trabalho. As misturas com maiores quantidades de finos apresentaram uma maior quantidade de calor gerado, maior velocidade no processo de hidratação, e uma redução significativa nos tempos até o pico de calor, e conseqüentemente redução nos tempos de pega das argamassas. É evidente que a maior presença de finos antecipou as reações de hidratação, tendo em vista que o aumento da superfície específica da massa tem impacto direto nas reações químicas das misturas com cimento.

Em relação a resistência à compressão das argamassas, houve um ganho significativo na resistência das misturas com maior quantidade de finos, principalmente aos 7 dias. Foi possível observar também que, as misturas que

tiveram maior quantidade de ar incorporado, foi a que teve um menor ganho de resistência entre os 7 e 28 dias.

5.2 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestões para futuros trabalhos a serem desenvolvidos sobre o tema, pode-se destacar o aprofundamento sobre alguns aspectos abordados, a fim de entender de forma mais profunda a influência da finura do cimento nas propriedades das misturas cimentícias.

- Estudo da influência da finura do cimento em concretos estruturais, concretos autoadensáveis, e concretos especiais;
- Estudo a partir da utilização de outros aditivos promotores de moagem;
- Estudo utilizando aditivo promotor de moagem para diferentes tempos de moagem;
- Análise mais profunda acerca da granulometria pós moagem dos cimentos;
- Estudos buscando encontrar a faixa granulométrica mais otimizada dos cimentos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, L.B.; BORGES, J. G.; SILVA, E.F.; *et al.* **Revista Matéria**, v.25, n.4, 2020.

ANSARI, Wajahat Sammer; CHANG, Jun. **Influence of fine cement sand paste in preparation of cementitious materials**. Construction and Building Materials, v. 230, p.1-13, 2020.

ANDRADE, L.B., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. **Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete**. Construction & Building Materials, 2008.

AREIA NORMAL BRASILEIRA. Disponível em <<https://www.ipt.br/areianormal>> Acesso em julho 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Básico sobre o cimento. Disponível em <<https://abcp.org.br/cimento>> Acesso julho 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7ª Edição. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em <<https://abcp.org.br/cimento/historia>> Acesso março 2022.

_____. **ABNT NBR 13278**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 16372**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

_____. **ABNT NBR 16697**. Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **ABNT NBR 7211**. Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

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

_____. **ABNT NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BENINGFIELD, N. **Air entrainment of mortar**. In: INTERNATIONAL BRICK/BLOCK MASONRY CONFERENCE IRELAND, 8., Warwickshire, 1988. **Proceedings [...]** Warwickshire, 1998.

CHEN, J. J.; KWAN, A. K. H. **Superfine cement for improving packing density, rheology, and strength of cement paste**. Cement and Concrete Composites, v. 34, n. 1, p. 1-10, 2012.

CHEN, Xudong; XU, Lingyu; WU, Shengxing. **Influence of pore structure on mechanical behavior of concrete under high strain rates**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, n. 2, p. 04015110 (1-10), 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2011.

DE CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Ceramica 55. 18-32. 2009

DE MATOS, P. R. DE *et al.* **Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes containing porcelain polishing residue**. Construction and Building Materials, v. 175, p. 508–518, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola Estatística da Produção Agrícola**. 2021

KWAN, A. K. H.; WONG, H. H. C. **Packing density of cementitious materials: Part 2-packing and flow of OPC + PFA + CSF**. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, v. 41, n. 4, p. 773–784, 2008a

KWAN, A. K. H.; WONG, H. H. C. Effects of packing density, excess water and solid surface area on flowability of cement paste. **Advances in Cement Research**, v. 20, n. 1, p. 1–11, 2008b.

LI, H. J.; YANG, L.; XIE, Y. J. **Effect of fineness on the properties of cement paste**. Key Engineering Materials, v. 629–630, p. 366–370, 2015.

LIAN, C.; ZHUGE, Y.; BEECHAM, S. **The relationship between porosity and strength for porous concrete**. Construction and Building Materials, v. 25, n. 11, p. 4294–4298, 2011.

LYRA, J.S. **Estudo da influência de policarboxilato comercial na hidratação, reologia e físico-química de superfície do cimento**. Dissertação de mestrado, PMT/Poli/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2010.

MANZANO, M.A.R. **Estudo Experimental de Materiais Cimentícios de Alta Resistência modificados com Polímeros Superabsorventes (PSAs) como Agentes de Cura Interna**. Tese de doutorado, PECC/UnB, Brasília, DF, Brasil, 2016.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETE: MICROSTRUCTURE, PROPERTIES, AND MATERIALS**. 3ª Ed. Nova Iorque: Mcgraw Hill Professional, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

NEHDI, M.; MINDESS, S.; AITCIN, P-C. **RHEOLOGY OF HIGH-PERFORMANCE CONCRETE: EFFECT OF ULTRAFINE PARTICLES**. Cement and Concrete Research, v. 28, n. 5, p. 687–697, 1998.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

SAJEDI, Fathollah; RAZAK, Hashim Abdul. **Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars**. Construction and Building Materials, v. 25, n. 4, p. 2036-2045, 2011.

SEIDLER, N.; DAL MOLIN, D. C. **Influência das adições minerais e da resistência a compressão na carbonatação dos concretos**. In: 48 Congresso Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro: IBRACON, 2006.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual**. 40 f. 2013.

Shi, Y.; Wang, T.; Li, H.; Wu, S. **Explorando os Fatores de Influência da Hidratação Precoce do Cimento Ultrafino**. *Materiais* 2021, 14, 5657.

SO Ehikhuenmen *et al* 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **640** 012043.

TAYLOR H.F.W. **Cement Chemistry. 2ª edition**. Thomas Telford Ltd, 1997. 480 p.

TEKES – National Technology Agency. **By-products and recycled materials in earth structures: materials and applications**. In: MÄKELÄ, H; HÖYNALA, H. (Editors) *Technology Review* 92/2000. Helsinki, 2000.

TOPRAK, Nurettin Alper *et al*. Effects of grinding aid dosage on circuit performance and cement fineness. **Construction and Building Materials**, v. 265, 2020.

VIECILI, M. J. C.; HASTENPFLUG, D.; GIRARDI, R. **Revista Matéria**, v.23, n.3, 2018.

VITALI, Maria R. V. **Efeito do distanciamento ao mar da contaminação do concreto por cloretos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, 2013.

ZHANG, Bingliu *et al*. **Preparation and application of fine-grinded cement in cement-based material**. *Construction and Building Materials*, v. 157, p. 34-41, 2017.

ZHANG, T. *et al*. **Effects of size fraction on composition and fundamental properties of Portland cement**. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 7, p. 3038–3043, 2011.

WEAKLEY, R. W. **“Evaluation of Semi-Adiabatic Calorimetry to Quantify Concrete Setting”**. Auburn, Alabama, Dissertation M.Sc., Faculty of Auburn University, USA, 2010.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. **Packing density of cementitious materials: Part 1-measurement using a wet packing method**. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 41, n. 4, p. 689–701, 2008.