



VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA NA VELOCIDADE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

SÃO PAULO
2020



CRISTIANO FÁBIO MENDES

EDUARDO TADEU LACRETA DE TOLEDO FILHO

VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA NA VELOCIDADE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Patologia das Obras Cíveis, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca.

SÃO PAULO

2020

AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro civil prof. De Luca pela valiosa colaboração no levantamento de campo deste trabalho.

Agradecer ao Laboratório ABCP em especial aos Srs. Flávio Munhoz, Edgar Oliveira e Mauricio Pires, pelo conhecimento compartilhado, explicações fornecidas e pela bolsa oferecida ao grupo para usufruto da câmara de carbonatação.

Agradecer a todos os nossos familiares e amigos pelo apoio e incentivo dado ao longo do trabalho.

RESUMO

O presente trabalho verifica a influência da reação pozolânica (após a adição de sílica) no potencial hidrogeniônico (PH) e na velocidade da frente de carbonatação do concreto. Este processo está associado à ação do gás carbônico (CO_2) junto ao concreto e se tornando um dos principais fatores iniciadores da corrosão das armaduras. Através do ensaio de carbonatação acelerada, foi simulado a ação do CO_2 no concreto. Para o estudo desenvolveu-se concretos com relações água/cimento (a/c) de 0,45, 0,55 e 0,65, bem como adições de sílica ativa nas proporções de 0, 5, 10 e 15 % para cada a/c. Em uma câmara com sistema de confinamento rigoroso, submeteu-se as amostras de concretos a uma concentração de 5% de CO_2 , umidade 65% e temperatura ambiente 23°C. No compartimento, de forma distribuída colocou-se os 24 corpos de provas sendo dois para cada um dos 12 tipos de concreto analisados. Com as amostras na condição ideal para aplicação dos testes em câmara, realizou-se um ensaio inicial antes da exposição, com intuito de verificar a possível baixa de PH por reação pozolânica. A cada 7 dias retirou-se uma amostra dos concretos e aplicou-se a solução de fenolftaleína para medição progressão da frente de carbonatação. Este processo repetiu-se durante 8 semanas ininterruptas. Evidenciou-se que os concretos com $a/c \geq 0,55$ obtiveram antes mesmo de serem aplicados a exposição de CO_2 em câmara uma frente máxima de 2mm de carbonatação. Dentro de cada grupo de a/c analisados os valores de frente de carbonatação comparados com o referencial e a pior situação (15% de sílica), tiveram amplitude próximas de 20%. Em números a máxima frente coletada dentre todos os concretos apresenta-se com máximo 25 mm e média máxima de 23,8mm.

Palavras chave: carbonatação, corrosão, câmara, concretos, CO_2 .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico Relação Água/Cimento x Resistência (BRANCO, PIERETTI, 2012, p.18).....	27
Figura 2. Exposição da Armadura Pós Desplacamento do Concreto (ARAKI ENGENHARIA, 2018, s.p.)	36
Figura 3. Garagem em Subsolo com incidencia de Carbonatação (ARAKI ENGENHARIA, 2018, s.p.)	37
Figura 4. Areia Natural Média.....	41
Figura 5. Pó de Pedra Basáltico.....	41
Figura 6. Quarteamento do Agregado Miúdo Fonte: (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	41
Figura 7. Conjunto de Peneiras para Ensaio Granulométrico de Agregado Miúdo (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	43
Figura 8. Lavagem de amostra para eliminação de material Fino (75µm) (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	45
Figura 9. Pesagem do Conjunto Frasco e Agregado Miúdo (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	47
Figura 10. Brita 0.....	48
Figura 11. Brita 1	48
Figura 12. Processo de Secagem da Umidade Superficial do Agregado (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	48
Figura 13. Balança e Recipiente para Registro de Massa Submersa (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	49
Figura 14. Ensaio de Agregado Miúdo com o Tronco-cônico (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	50
Figura 15. Ensaio de Massa Unitária para Agregado Miúdo (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	52
Figura 16. Conjunto de Peneira para ensaio de módulo de finura do Cimento (ABNT-NBR11579. 1991, p.02)	54

Figura 17. Corpos de Provas 10x20 cm (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	55
Figura 18. Prensa Hidráulica (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	56
Figura 19. Representação Esquemática do Slump Test (SERAFIM, 2013, s.p.)	57
Figura 20. Câmara de Carbonatação de concretos (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	69
Figura 21. Concretos com aplicação de fenolftaleína (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Correspondência entre a Classe de Agressividade e a Qualidade do Concreto (ABNT, NBR6118, 2014, p.18).....	32
Tabela 2. Correspondência entre a Classe de Agressividade e a Qualidade do Concreto (ABNT, NBR6118, 2014, p.38).....	32
Tabela 3. Identificação das Classes de Agressividade Ambiental (NBR6118 – 2014).....	37
Tabela 4. Composição Granulométrica da Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	59
Tabela 5. Síntese dos Resultados de Ensaio da Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	60
Tabela 6. Composição Granulométrica do Pó de Pedra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	60
Tabela 7. Síntese dos Resultados de Ensaio do Pó de Pedra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	61
Tabela 8. Material Passante Através da Peneira 75µm Para Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	61
Tabela 9. Material Passante Através da Peneira 75µm Para Pó de Pedra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	61
Tabela 10. Massa Específica e Massa Específica Aparente da Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	62
Tabela 11. Massa Específica e Massa Específica Aparente do Pó de Pedra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	62
Tabela 12. Absorção de Água da Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	63
Tabela 13. Absorção de Água do Pó de Pedra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	63
Tabela 14. Composição Granulométrica da Brita 0 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	64

Tabela 15. Composição Granulométrica da Brita 1 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	64
Tabela 16. Material Fino Passante Através da Peneira 75 μ m para a Brita 0 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	65
Tabela 17. Material Fino Passante Através da Peneira 75 μ m para a Brita 1 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	65
Tabela 18. Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção da Brita 0 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	65
Tabela 19. Massa Específica, Massa Especifica Aparente e Absorção da Brita 1 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	66
Tabela 20. Massa Unitária e Índice de Vazios da Brita 0 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	66
Tabela 21. Massa Unitária e Índice de Vazios da Brita 1 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	66
Tabela 22. Módulo de Finura, Tempo de pega Inicial e Final do Cimento.....	67
Tabela 23. Concretos Reproduzidos e seus respectivos resultados (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	68
Tabela 24. Características dos Materiais Constituintes do Concreto Padrão (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	68
Tabela 25. Características dos Materiais Constituintes do Concreto Padrão (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	68
Tabela 26. Profundidade de Carbonatação nos concretos com A/C 0,45. (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	71
Tabela 27. Profundidade de Carbonatação nos concretos com A/C 0,45. (Autor, apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	72
Tabela 28. Profundidade de Carbonatação nos concretos com A/C 0,65. (Autor, apoio laboratório terceiro, 2019, s.p).....	73
Tabela 29. Coeficientes de Carbonatação de Concretos. (Autor, apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)	73

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS.....	7
SUMÁRIO.....	9
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	16
1.2. OBJETIVOS.....	16
1.2.1. Objetivo Geral	16
1.2.2. Objetivo Específico	16
1.3. HIPÓTESE	16
1.4. JUSTIFICATIVAS	17
1.4.1. Tecnológicas.....	17
1.4.2. Econômicas	17
1.4.3. Sociais	18
1.4.4. Ecológicas	19
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1. CONCRETO	21
2.2. HISTÓRICO DO CONCRETO	22
2.3. COMPONENTES DO CONCRETO.....	22
2.3.1. Aglomerantes	23
2.3.2. Agregados Graúdos e Miúdos	24
2.3.3. Água	26
2.4. MODALIDADE DE CONCRETOS.....	27
2.4.1. Concretos Característicos.....	27
2.4.2. Concreto Auto Adensável	28
2.5. DOSAGEM DE CONCRETO	29

2.5.1. Tipos de Dosagem	30
2.6. NORMALIZAÇÃO	30
2.7. PARÂMETROS DE QUALIDADE	31
2.8. MATERIAIS POZOLÂNICOS	33
2.8.1. Conceito.....	33
2.8.2. Reações Pozolânicas	34
2.8.3. Sílica Ativa	35
2.9. CARBONATAÇÃO	35
2.9.1. Conceito.....	35
2.9.2. Manifestação Patológica	36
2.9.3. Cuidados Para Evitar a Carbonatação	37
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E AGLOMERANTES	40
3.1.1. Determinação da composição granulométrica	40
3.1.1.1 Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo	40
3.1.1.2 Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo	44
3.1.2. Determinação do material fino - passante na peneira 75 µm	44
3.1.2.1 Determinação do material fino para o agregado graúdo	45
3.1.3. Determinação da massa específica e massa específica aparente.....	45
3.1.3.1 Determinação da massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo	45
3.1.3.2 Determinação da massa específica e massa específica aparente do agregado graúdo	47
3.1.4. Determinação da absorção de água	49
3.1.4.1 Determinação da absorção de água do agregado miúdo.....	49
3.1.4.2 Determinação da absorção de água do agregado graúdo	50
3.1.5. Massa unitária	51
3.1.6. Volume de vazios	52
3.1.7. Módulo de finura do cimento	53

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	54
3.2.1. Consistência do concreto (Slump Test).....	56
3.2.2. Tempos de pega do concreto	57
3.2.3. Resistência à compressão	58
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
4.1. PROPRIEDADES DO AGREGADO MIÚDO	59
4.2. PROPRIEDADES DO AGREGADO GRAÚDO.....	63
4.3. MÓDULO DE FISSURA E TEMPO DE PEGA DO CIMENTO	67
4.4. DOSAGEM DE CONCRETO ADOTADA PARA REALIZAÇÃO DOS ESTUDOS	67
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

1. INTRODUÇÃO

A temática principal deste trabalho de conclusão de curso é verificar a influência da sílica ativa na frente de carbonatação do concreto.

O concreto faz parte da evolução do homem e está presente em todas as obras projetadas para a melhoria das condições de vida da humanidade. Seria muito difícil imaginar o progresso se não fizéssemos o uso do concreto. Basta verificar que os parâmetros de medida do progresso das nações e o consumo per capita do concreto (ALVES, 2005).

Desde a antiguidade clássica os homens se serviam da matéria prima para satisfazerem suas necessidades. De acordo com Cohen (1988), a argila foi o primeiro material manipulado pelo homem de modo intencional: para se fazer uma pedra artificial dura a partir de terra argilosa mole e moldável, para a fabricação de objetos e utensílios domésticos.

Com a descoberta da cal hidratada, aglomerantes e argamassas, a utilização do concreto passou a ter uma nova dimensão. Na civilização grega, a terra vulcânica e cal foram utilizadas para a execução de argamassa de cal utilizada em edifícios e obras de infraestruturas. No estudo de caso de Kouï e Ftikos (1998) é relatado sobre a construção de uma cisterna de concreto para armazenamento de água da chuva por volta do século VII a.C.

Já o concreto romano (*opus caementicium* ou *concretus*), o primeiro material artificial a ser fabricado e empregado em construções em grande escala, motivou avanço técnico inexistente para a época e revolucionou o curso da arquitetura e engenharia ocidental (YEGUL, 2011).

De acordo com Isaia (2011), o uso do concreto se difundiu e, mais rapidamente, após a Segunda Guerra Mundial, em 1945, para a reconstrução dos países devastados pelo conflito. Seu emprego crescente se deve às vantagens inerentes, à sua constituição

e ao modo de aplicação, apresentando propriedades adequadas e versatilidade de uso que o tornam imprescindível para a grande maioria das construções.

Com o desenvolvimento dos estudos junto à tecnologia, o concreto passou a ter diversificação em sua composição. A necessidade, o tipo e a localização da obra, acabam interferindo na escolha do traço, aditivos e dos tipos de agregados a serem usados no concreto com a finalidade de se obterem um bom rendimento deste material.

Um bom exemplo de material utilizado para melhorar o rendimento do concreto são os materiais silicosos ou silicoaluminosos, conhecidos como materiais pozolânicos. Estes estão presentes em cimentos, tais como CP-II-Z (Cimento Portland composto com pozolana) e CP-IV (Cimento Portland Pozolânico), utilizados para melhorar a impermeabilidade, durabilidade e resistência do concreto de acordo com a necessidade da obra.

O fenômeno da carbonatação tem-se mostrado como um dos importantes problemas e riscos para as estruturas de concreto armado. Segundo Kazmierczak (2009), a carbonatação é um fenômeno físico-químico bastante complexo que pode limitar a vida útil das estruturas de concreto armado.

Sobre o tema dessa pesquisa, observa-se que, existem alguns estudiosos com diferentes considerações em relação às interações químicas pozolânicas oriundas de adições minerais na formulação dos traços de concreto, onde se verifica melhorias no acabamento de peças, diminuição do índice de vazios e por consequência aumento da resistência a compressão.

Em contrapartida há outros que complementam que estas reações químicas provenientes das adições trazem consigo uma baixa de potencial hidrogeniônico (PH), logo existiria outro ponto a considerar em relação a mudanças de alcalinidade do concreto. Na hipótese de que o PH altere significativamente com estes compostos adicionados ao concreto ao longo do tempo, em um determinado período diante de um teste em uma estrutura exposta a CO_2 e adotando o uso destas adições, teria se uma soma de baixa de PH por reações pozolânicas e / ou outra por frente de carbonatação.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A adição da sílica ativa influencia na velocidade da frente de carbonatação do concreto?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Verificar a influência da sílica ativa na velocidade da frente de carbonatação do concreto.

1.2.2. Objetivo Específico

Verificar a profundidade de carbonatação no concreto para diferentes teores de sílica ativa.

1.3. HIPÓTESE

Presume que sim, pois nas reações pozolânicas, a sílica teria uma reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) resultante da hidratação do cimento, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), logo teria se uma diminuição nos teores de Ca(OH)_2 e baixa do PH da água capilar.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentam-se as justificativas para a pesquisa, a saber: tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas.

1.4.1. Tecnológicas

O concreto é um material construtivo largamente utilizado seja em casas de alvenaria, em rodovias, em pontes, nos edifícios de grandes altitudes, em torres de resfriamento, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento, até em plataformas de extração petrolíferas móveis e, a cada dia, mais novos investimentos são despendidos para aprimorar, viabilizar novos tipos e atender necessidades. Com pesquisas aprofundadas e duradouras, especialistas desenvolvem testes com aditivos especiais, agregados e equipamentos bem como métodos complexos, todos com direcionamento a atender esta demanda efervescente do mercado da construção civil. Dessa forma, todas as obras precisam de cuidados para que tenham durabilidade prolongada e o menor grau de necessidade de intervenções para manutenção e reparos por falha em alguma etapa construtiva da edificação desde o projeto à execução.

Considerando o volume considerável de concreto armado presente nas obras, entende-se que saber antecipadamente sobre a possibilidade de uma adição comumente utilizada vir a interferir na aceleração ou não da frente de carbonatação seria um avanço tecnológico valioso no momento de se fazer escolhas para novas dosagens.

1.4.2. Econômicas

Segundo Isaia (2011) o concreto é um dos materiais que mais se adaptam ao conceito de sustentabilidade, tão difundido e requerido hoje em todos os setores da

sociedade, porque, pelo efeito de escala do seu uso, pequenos ganhos unitários podem se transformar em valores muito expressivos em economia de matéria prima.

A durabilidade estimada das obras em concreto armado varia de 15 a 50 anos. Prevê-se a necessidade de manutenções preventivas e periódicas a cada 3 ou 5 anos. Muitas vezes, com histórico relevante de ocorrências de instauração de processo inicial de carbonatação, o que gera a necessidade de gasto com profissionais, equipamentos e novos materiais para substituição das regiões afetadas. Com tudo isso, é notório que haverá um custo substantivo nestas intervenções.

De fato, considerando a questão econômica, e que esse custo pode ser reduzido ou evitado, se inicialmente for realizada a escolha adequada da dosagem e/ou adições de modo a garantir menor risco de sofrer com o fenômeno da carbonatação. Em suma, a diminuição da necessidade de intervenções devido à escolha adequada de quais compostos adicionar ao concreto, colaborará para a redução dos gastos com manutenção e recuperação.

1.4.3. Sociais

Corriqueiramente registram-se pontos em construções com processo instaurado de concreto carbonatado e de corrosão de armaduras, seja em garagens de subsolo ou até mesmo em tuneis. Para a maioria das pessoas que não são da área, leigos, pode surgir uma impressão ruim ao ver a manifestação patológica, associando isso a um desconforto, ao receio de haver algum risco à segurança, à estética desagradável, etc.

Sob outro aspecto, quando surge a necessidade de uma equipe técnica realizar procedimentos corretivos, ocorrem transtornos diretos ou indiretos aos usuários, tal como a necessidade de desvio do trânsito de uma via, que pode gerar congestionamentos. Ou ainda, em um condomínio, usuários tem a vaga de garagem interditada para reparos em áreas próximas ou terem caminhos interrompidos.

Sabe-se que processos de manutenção, muitas vezes, são procedimentos demorados e geram transtornos à população diretamente interessada.

Sendo assim, um estudo bem elaborado pode contribuir para se evitar esses tipos de ocorrências além de apresentar uma solução antecipada para estes importunos e recorrentes problemas.

1.4.4. Ecológicas

A aceleração do crescimento populacional, associado ao desenvolvimento tecnológico, impulsionou a busca por novas formas de atender a demanda na esfera profissional, social e econômica, o que gera maior consumo de recursos naturais.

Toda estrutura precisa de intervenção e reparos ao longo do tempo, tanto preventivos quanto corretivos. Em ambos os processos são gerados resíduos.

Após a reparação de uma estrutura de concreto com manifestação patológica de carbonatação o concreto substituído é descartado, sendo o volume significativo.

Com o aumento do período necessário para reparos associado à carbonatação, entende-se que será evitado o uso de novos recursos naturais para recuperação e a geração de resíduos para o ambiente.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos envolvidos no estudo serão desenvolvidos conforme a sequência:

- ✓ Pesquisa bibliográfica de parâmetros para moldagem de corpos de prova (CPs) e para a realização de ensaios. E, estabelecimento de parâmetros, traços, relação água/cimento, consumo de cimento (kg/m^3), abatimento, etc.

- ✓ Moldagem de corpos de prova com os agregados diferentes teores de sílica, bem como diferentes A/C.
- ✓ Realização do Ensaio Acelerado de Carbonatação, em câmara de Carbonatação controlada.
- ✓ Inspeções com periodicidade estabelecida e aplicação de produto para verificação da profundidade da frente de carbonatação dos CPs compostos por cada concreto. Anotação dos resultados verificados.
- ✓ Ao final, serão realizadas comparações dos resultados obtidos nas verificações.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados conceitos, tais como, histórico e componentes do concreto, normas relacionadas ao concreto, conceitos e propriedades da sílica ativa, e sobre os efeitos e tratamentos da carbonatação, que contribuirão para um melhor entendimento do assunto a ser tratado no trabalho.

2.1. CONCRETO

Para Neville (2013), o concreto, no sentido mais amplo, é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante. Geralmente esse meio é o produto da reação entre um cimento hidráulico e água, mas atualmente mesmo essa definição pode cobrir uma larga gama de produtos. O concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras. Além disso, esses concretos podem ser aquecidos, curados a vapor, auto-clavados, tratados a vácuo prensados, vibrados por impactos (shock-vibrated), extrudados e projetados.

Pedra artificial que se molda à inventividade construtiva do homem, capaz de desenvolver um material que, depois de endurecido, tem resistência similar às das rochas naturais e quando no estado fresco, é composto plástico: possibilita sua modelagem em formas e tamanhos os mais variados. (PEDROSO, 2009, p.14).

As propriedades do concreto e sua importância para os engenheiros se dividem em duas fases da sua vida: fase de mistura, lançamento, compactação e acabamento e a fase do concreto em endurecimento, endurecido e em serviço. Trabalhabilidade, plasticidade, retração autógena, tempo de pega inicial e tempo de pega final são alguns exemplos das propriedades do concreto na primeira fase. Resistência do concreto à compressão e à tração, resistência ao

desgaste superficial, resistência ao impacto, módulo de elasticidade, porosidade, fluência e retração são outros alguns exemplos de propriedades do concreto na segunda fase. (CARDOSO e MORISHITA, 2013, p.1).

2.2. HISTÓRICO DO CONCRETO

A origem do concreto foi condicionada ao descobrimento de um agente aglomerante cimentício. Desse modo, pode-se considerar como o início do concreto o século II AC, com o surgimento do primeiro aglomerante conhecido. Considerada um tipo especial de areia vulcânica chamada ‘pozolana’, encontrada apenas na região sul da Itália, na baía de Nápoles, próximo a Pozzuoli, de onde o nome se originou, sendo extremamente utilizada pelos romanos em sua argamassa, dando origem a diversas construções, das quais a mais antiga de que se tem notícia é o Pórtico Amélia, construída em 193 AC. A pozolana é uma ‘areia’ especial, que reage quimicamente com cal e água, formando uma pedra artificial, resistente mesmo quando submersa. Esse material era utilizado com pedras de diferentes tamanhos, mantendo-as unidas e formando um tipo rudimentar de concreto (METHA e MONTEIRO, 1994).

2.3. COMPONENTES DO CONCRETO

De acordo com Metha e Monteiro (1994), concreto é um material composto que consiste, em um aglomerante no qual estão aglutinados partículas ou fragmentos de agregados. O concreto de cimento hidráulico, é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água.

2.3.1. Aglomerantes

Dentre os vários aglomerantes para o concreto, após diversas análises e descobertas por conceituados engenheiros e academias de ciências tecnológicas, os cimentos foram adquirindo características e inovações, e hoje contamos com belíssimas obras de artes e as mais ousadas construções. Na origem do cimento importantes descobertas foram aprimoradas pelos estudiosos.

Em 1791, o engenheiro James Parker descobriu um cimento (patenteado em 1796 com o nome de Cimento Romano) que teve uma grande aceitação por suas excelentes qualidades. Expirada a patente (na época válida por 14 anos) químicos e engenheiros chegaram à conclusão de que com a mistura de pedras calcárias com aproximadamente um terço de argila e uma pequena quantidade de óxido de ferro, se conseguia um cimento similar ao cimento de Parker. Louis Vicat (1786 - 1861) engenheiro francês formado pela École Polytechnique (1804) e pela École des Ponts et Chaussées (1806) é considerado o inventor do cimento artificial. Vicat publicou, em 1817, o trabalho *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires* no qual apresentava resultados de uma pesquisa em que obtinha um cimento com a queima de uma mistura de calcário e argila.

Em 1824 Joseph Aspdin solicitou e obteve a Patente para um aperfeiçoamento no método de produzir a pedra artificial. Aspdin deu-lhe o nome de Cimento Portland por sua semelhança, com a famosa pedra calcária branco-prateada que se extraía há mais de três séculos de algumas pedreiras existentes na pequena península de Portland no Condado de Dorset. Com a patente, associou-se com William Beverly e montaram em 1828 uma fábrica em Wakefield, próxima de Leeds, a Aspdin & Beverly Patent Portland Cement Manufacturers.(CARVALHO, 2008, p.6)

Em conformidade com a ABNT, os cimentos Portland foram especificados da seguinte forma:

- Cimento Portland Comum: CPI;
- Cimento Portland com adição: CPI-S;
- Cimento Portland Composto com Escória: CPII-E;
- Cimento Portland Composto com Pozolana: CP-Z;
- Cimento Portland Composto com Filler: CPII-F
- Cimento Portland de Alto-forno: CPIII;
- Cimento Portland Pozolânico: CPIV;
- Cimento Portland Composto de Alta Resistência Inicial: CPV-ARI;
- Cimento Portland Branco.

Estes cimentos apresentam inúmeras reologias diferenciadas, bom como são empregados em situações específicas, (ALVES, 2005).

2.3.2. Agregados Graúdos e Miúdos

Em formação com a pasta cimentícia inúmeras características são peculiares ao agregado, seja no ponto de vista petrológico, britado ou natural, classificação em grupos, características comuns, tipos de rocha, dentre outras. Caso o agregado possua algum tipo de característica inadequada, põem em risco a obtenção de um concreto de boa qualidade.

Podem se dividir segundo tamanho de grãos em agregado miúdo e agregado graúdo, cuja separação, dada pela peneira de malha 4,75mm, e definição são praticamente um consenso na literatura. A definição apresentada tem por base a NBR 7211 (ABNT, 2005), a saber: Agregado miúdo: agregado cujos grãos passam pela peneira de malha 4,75mm e ficam retidos na malha de 0,15mm em ensaio de peneiramento, areia natural quartzosa, ou se artificial, resultante do britamento de rochas estáveis. Agregado graúdo: agregado cujos grãos passam pela peneira de malha 75 mm

e ficam retidos na malha de 4,75mm em ensaio de peneiramento, pedregulho natural proveniente do britamento de rochas estáveis. (ABNT, 1999).

Do ponto de vista petrográfico, os agregados podem ser divididos em vários grupos de rochas com características comuns. A classificação em grupos não significa a adequação do agregado à produção de concreto, pois materiais inadequados podem ser encontrados em qualquer grupo, embora alguns grupos tenham a tendência de ter melhores resultados que outros. Deve ser ressaltado que várias denominações comerciais e usuais frequentemente não correspondem à classificação petrográfica correta, (NEVILLE & BROOKS, 2013, p 42).

Outras características importantes dos agregados estão ligadas as formas das partículas e a textura, relacionadas com a origem da rocha-mãe.

O arredondamento avalia a agudeza relativa ou angulosidade das arestas de uma partícula. O arredondamento real é consequência da resistência mecânica e resistência ao desgaste da rocha-mãe e do desgaste a que a partícula foi submetida, (NEVILLE & BROOKS, 2013, p 44).

Outro aspecto da forma dos agregados graúdos é sua esfericidade, definida como uma função da relação entre área superficial da partícula e seu volume (superfície específica). A esfericidade está relacionada à estratificação e clivagem da rocha-mãe e é influenciada também pelo tipo de equipamento de britagem nos casos de redução das dimensões artificialmente. Partículas com elevada relação entre área superficial e volume são de especial interesse, já que diminuem a trabalhabilidade das misturas. Partículas alongadas e lamelares têm essa característica, sendo que as últimas podem influenciar negativamente na durabilidade do concreto, pois têm a tendência de se acomodar segundo um plano orientado, com formação de vazios e acúmulo de água abaixo dele. A presença de partículas alongadas ou lamelares, acima de 10 a 15% em relação à massa de agregados graúdos, geralmente é considerada indesejável, apesar de não haver limites estabelecidos, (NEVILLE & BROOKS, 2013, p 45).

A classificação segundo a textura superficial é baseada no grau de polimento da superfície das partículas, sendo polidas ou opacas, lisas ou ásperas. O tipo de aspereza também deve ser analisado. A textura superficial depende da dureza, de dimensões dos grãos e de características de porosidade da rocha-mãe (rochas duras, densas e grãos finos em geral resultam em superfícies de fratura lisas), bem como o grau com que as forças atuantes sobre a superfície das partículas as tenham alisado ou tornado ásperas, (NEVILLE & BROOKS, 2013, p 46).

2.3.3. Água

Fundamental para a formulação dos concretos levando em consideração suas finalidades. Sua utilização não menos que os demais, deve se ter uma atenção especial visto ser de grande impacto para a qualidade do concreto propriamente dito. Para a água de amassamento tem-se uma premissa “se a água é boa para beber, também será boa para o uso na fabricação de concreto”, o que na verdade nem sempre se aprova. A presença de certas substâncias, tais como, citratos e açúcares não a tornam imprópria para beber , mas podem ser reprovadas para água de amassamento, (PITTA, CARVALHO, RODRIGUES, 1999, p.85).

A qualidade da água é importante porque suas impurezas podem interferir na pega do cimento, afetar negativamente a resistência do concreto ou causar manchamento de sua superfície, podendo ainda levar à corrosão das armaduras, (NEVILLE & BROOKS, 2013, p 74).

Além da qualidade da água a razão entre a quantidade de água acrescida e a quantidade de cimento utilizada na produção do concreto é muito importante para determinar a sua resistência final. Abrams em 1919 publicou um trabalho no qual demonstrava que a resistência do concreto dependia das propriedades da pasta endurecida, as quais eram função do fator água/cimento da mistura, Figura 1.

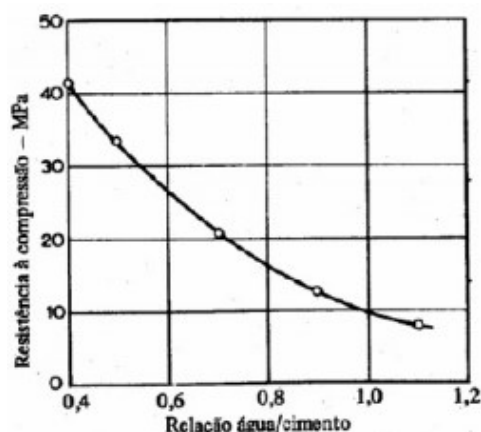


Figura 1. Gráfico Relação Água/Cimento x Resistência (BRANCO, PIERETTI, 2012, p.18)

A relação água/cimento, de acordo com Neville (1997), estabelece ainda a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer estágio de hidratação. Desta forma, nota-se que a relação água/cimento influencia, juntamente com o grau de adensamento, o volume de vazios do concreto.

2.4. MODALIDADE DE CONCRETOS

O mercado da construção civil evolui constantemente e as demandas específicas deste setor impulsionam significativamente para o crescimento de novos modelos de concretos, lista-se os seguintes:

2.4.1. Concretos Característicos

Diante das inovações e necessidades das obras, são formulados diferentes concretos:

- Concreto Aparente: carece de alguns, tais como, tipo de formas, madeiras, atenção ao uso desmoldantes, vibração adequada para evitar o aparecimento do

agregado graúdo na superfície. Neste caso este concreto permite adições de pigmentos de coloração a mistura.

- **Concreto Leve:** Para sua confecção usam-se materiais de massa específica baixa, diferente do convencional. Possui características tais como boa isolamento térmicoacústica e bom comportamento diante do fogo. Comumente utilizado em rebaixamento de laje, paredes e forros isolantes, nivelamento de pisos, dentre outras aplicações.

- **Concreto Pesado:** Normalmente em sua composição utilizam-se minérios que possui alta densidade, barita, hematita, limonita. Comumente utilizado em lastros e painéis de chumbo, locais que trabalham com aparelhos que emitem radiações.

- **Concreto Bombeável:** Utilizado em sistemas de concretagem onde seu deslocamento é auxiliado por bombas, normalmente suportadas por caminhões betoneiras e necessita de certa fluidez, tão logo seu uso é em locais de difícil acesso com grandes alturas e distancias, como torres, pontes e viadutos.

- **Concreto Projetado:** Baixa trabalhabilidade, dosado com cimento, areia, pedriscos e aditivos. Necessitam de equipamentos diferenciados para sua aplicação, hora em lajes, revestimentos, túneis, paredes e pilares.

- **Concreto de Alta Resistência Inicial:** Característica atribuída devido a utilização de aglomerantes com alta resistência inicial (CPV-ARI). Dessa forma há um ganho de tempo e economia em formas, devido a possibilidade de retirada em tempo menor, dando possibilidade de utilização mais rápida. Muito aplicado em peças estruturais convencionais ou protendidas, (RIBEIRO, PINTO, STARLING, 2006, p. 70-72).

2.4.2. Concreto Auto Adensável

A ascensão de utilização do concreto em diversas áreas impulsionou significativamente sua ocorrência de erros no processo de adensamento, este processo

iniciou um problema relacionado à durabilidade da estrutura ocasionando uma redução na qualidade das construções. De certa forma esse fato acelerou ainda mais a necessidade de um concreto com maior grau de consistência ao ponto de dispensar o adensamento, possível com a utilização de superplastificantes, porém sua utilização foi limitada devido fatos de exsudação e segregação, (MELO, 2005, p.19).

Dentre esses aditivos, várias modalidades foram sintetizadas com diferentes propriedades ao concreto, tais como; melhor trabalhabilidade na mistura seca, aumento de vida útil, aceleração de pega ou endurecimento do aglomerante, promoção da reação pozolânica com cal livres do cimento, redução da permeabilidade, retardamento de pega do aglomerante, redução da densidade por incorporação de ar ao concreto, dentre outras características específicas, (ALVES, 2005 p.71-72).

2.5. DOSAGEM DE CONCRETO

Procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre materiais construtivos do concreto, conhecido também por traço. As unidades de medidas podem variar de massa ou volume, prevalecendo normalmente as proporções expressas em massa seca de materiais.

Considera-se como materiais passíveis de uso nos concretos e possíveis de serem utilizados num estudo de dosagem: os vários cimentos, os agregados miúdos, os agregados graúdos, a água, o ar incorporado, o ar aprisionado, os aditivos, as adições, os pigmentos e as fibras. Com relação aos agregados, pode ser feita distinção entre agregados reciclados, artificiais ou industrializados e naturais. (HELENE e TERZIAN, 1992, p.01).

2.5.1. Tipos de Dosagem

Com o avanço tecnológico e constantes pesquisas inúmeros modelos construtivos e técnicas diferentes cobram concretos com altas resistências em diferentes situações; (CAR ou HSC High Strength Concrete); concretos de alto desempenho (CAD ou HPC High-Performance Concrete); concretos autoadensáveis (CAA ou SCC Self-Compacting Concrete); concretos com altos teores de adições e pozolanas; concretos aparentes; concretos coloridos; concretos brancos; concretos com agregados reciclados, concretos duráveis e muitos outros. Diante de tantas possibilidades de concreto, escolher o modelo de dosagem que se obtenha o concreto ideal ao menor custo possível, torna essa atividade complexa e desafiadora. (HELENE e TERZIAN, 1992, p.28).

Com uma melhor dosagem, poderia beneficiar-se com uma redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂) à atmosfera, assim como uma redução de agregados por aumento de resistência mecânica do concreto pode representar milhares de toneladas de economia de recursos naturais.

2.6. NORMALIZAÇÃO

Todas as atividades relacionadas ao concreto, desde sua formulação até a cura local, se embasam em normas que facilitam e auxiliam as execuções: A NBR 12654 (ABNT, 1992) estabelece procedimentos para realização do controle tecnológico dos materiais empregados na produção do concreto. Outra norma brasileira de grande importância é a NBR 12655 (ABNT, 2006), que trata do preparo, controle e recebimento do concreto. Essa norma estabelece responsabilidades para a produção do concreto e critérios gerais para recebimento, estocagem e produção do concreto. Define também cálculo da resistência de dosagem e resistência característica à compressão máxima a ser adotada no projeto, em função das condições de preparo do concreto. Estabelece

especificações para o concreto que está exposto a ambientes sulfatados, e percentuais máximos de contaminação com cloretos, a partir da contaminação individual dos seus componentes e em função do tipo de concreto (armado ou protendido), bem como da agressividade do meio. (MELO, 2005).

A realização destas proporções visa estabelecer quantidades a serem seguidas objetivando redução do custo, melhor aproveitamento dos materiais disponíveis em certas localidades, garantindo sua utilização em condições ideais margeando lucro e unanimidade no mercado.

Dentre uma série de fatores a observar ressalta-se: maior resistência mecânica, maior durabilidade, trabalhabilidade adequada a cada situação, sustentabilidade, potencialização da durabilidade, dentre uma série de outras características que são relevadas a cada situação de aplicação do concreto. (HELENE, TERZIAN, 1992, p.2.).

2.7. PARÂMETROS DE QUALIDADE

O controle de qualidade do concreto tem alcançado grandes inovações por meio de novas gerações de equipamentos, que permitem monitorar o produto desde sua propriedade até a hidratação do cimento. Porém uma situação que chama atenção das construtoras é o agravamento dos problemas de durabilidade das estruturas nos centros urbanos, motivados pela poluição da atmosfera. Os ensaios de materiais, bem como o controle de qualidade são prioritários para estabelecer a avaliação do produto propriamente dito. Podem se avaliar outros setores que interferem no planejamento da qualidade do concreto, quais sejam, conforme Alves (2005, p.29):

- Variáveis dos testes;
- Equipamentos;
- Estocagem dos Corpos de Prova;
- Transporte e capeamento.

De acordo com, a NBR6118: 2014, os projetos de estruturas de concretos devem atender à alguns requisitos mínimos em relação a resistência e durabilidade do concreto, caso não se tenha uma forte correspondência entre relação água / cimento e a resistência a compressão do concreto, alguns valores devem ser adotados em consonância a agressividade ambiental exposta, conforme Tabelas 1 e 2, de classe de agressividade e a qualidade do concreto, bem como cobrimento respectivamente.

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Tabela 1. Correspondência entre a Classe de Agressividade e a Qualidade do Concreto (ABNT, NBR6118, 2014, p.18)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Tabela 2. Correspondência entre a Classe de Agressividade e a Qualidade do Concreto (ABNT, NBR6118, 2014, p.38)

Segundo Helene e Andrade, (2011, p.01), no Brasil, ainda não há um texto consensual de como deve ser um estudo de dosagem. A inexistência de um consenso nacional cristalizado numa norma brasileira sobre os procedimentos e parâmetros de dosagem tem levado vários pesquisadores a proporem seus próprios métodos de dosagem, muitas vezes confundidos com uma recomendação da instituição para a qual trabalham, ou através da qual foram publicados.

2.8. MATERIAIS POZOLÂNICOS

2.8.1. Conceito

De acordo com a NBR 12653 da ABNT, materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Podem ser classificados de acordo com sua origem em pozolanas naturais e artificiais. As pozolanas naturais tem origem vulcânica e as artificiais são provenientes de tratamento térmico ou são subprodutos industriais.

As pozolanas naturais são aquelas encontradas na natureza, fazendo parte desse grupo alguns materiais de origem vulcânica e também terras diatomáceas. Estas não são exploradas comercialmente no Brasil. Já as artificiais são as que sofreram algum tratamento térmico como argilas e determinadas rochas que contém sílica, ou as provenientes dos subprodutos de atividades industriais, sendo exemplificados pela cinza volante, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e bauxita (NITA e JOHN, 2007).

Além dos aspectos ambientais, a adição de pozolanas em concreto tende a refletir uma série de outros benefícios, tais como: i) *tecnológicos*, pelo aumento da

trabalhabilidade resultante, redução do consumo de água para o mesmo valor de abatimento, ampliação da durabilidade da estrutura ou melhoria das propriedades mecânicas; ii) *econômicos*, pela diminuição do consumo do aglomerante hidráulico por ser um dos insumos de mais alto custo em uma obra; e, iii) *ecológicos*, uma vez que grande parte das pozolanas provém de resíduos de processos industriais e cujo destino é o aterro sanitário (CARMO e PORTELLA, 2008).

As pozolanas podem contribuir para o ganho de resistência mecânica e redução de água para a trabalhabilidade devido efeito físico das partículas na distribuição granulométrica do sistema. Este fenômeno é mais acentuado para pozolanas mais finas, como a sílica ativa e o metacaulim. A sílica ativa possui diâmetro médio das partículas em 0,5 μm enquanto o cimento Portland 45 μm . Se teores de 15% de sílica forem utilizados como substituição ao cimento Portland são estimados 2 milhões de partículas de sílica ativa para cada grão de cimento Portland, (Holland, 2005 *apud* Nita e John et al., 2007 p 5 e 6).

2.8.2. Reações Pozolânicas

As reações pozolânicas são influenciadas pela área superficial das pozolanas, composição química das pozolanas, temperatura de reação e a presença de aditivos de acordo com Nita e John (2007).

Para a área superficial, além de analisar a pureza dos materiais, quanto maior forem às áreas superficiais, maior será a área de contato com os reagentes e maior será a interação entre os materiais.

Segundo Nita e John (2007), no caso da temperatura de reação, esta influenciará diretamente na velocidade da reação, afetando a cinética, formação e estabilidade dos produtos da hidratação. Para Oriol e Pera (1995) *apud* Nita e John (2007, p. 4), uma técnica para acelerar a reação pozolânica pelo incremento de temperatura consiste no aquecimento através de micro-ondas.

2.8.3. Sílica Ativa

Um exemplo de pozolana que será utilizada no estudo é a sílica ativa. Segundo a Rilem Technical Reports (1988) *apud* Carmo e Portella (2008, p.2), no processo de obtenção da sílica ativa, o silício é produzido em grandes fornos elétricos de fusão, do tipo arco-voltaico, onde o quartzo é reduzido pelo carbono em altas temperaturas. Como resultado tem-se a produção do monóxido de silício gasoso (SiO), que se condensa às temperaturas mais baixas, formando o dióxido de silício (SiO_2). Este apresenta uma coloração que pode variar do cinza claro ao escuro, devido aos teores de carbono incombusto presente.

Para Taylor (1990) *apud* Nita e John (2007, p. 9), a utilização da sílica ativa juntamente com o cimento Portland acelera a hidratação da alita (C_3S) e diminui a quantidade de água não evaporável se comparada com pastas puras de cimento Portland.

2.9. CARBONATAÇÃO

2.9.1. Conceito

A carbonatação é um fenômeno ocasionado pelas reações químicas resultantes da interação entre componentes como o CO_2 (gás carbônico), presentes na atmosfera, com os produtos da hidratação do cimento, dando origem a um composto chamado ácido carbônico (H_2CO_3). Ao reagir com a pasta de cimento hidratada, esse ácido resulta em carbonato de cálcio (CaCO_3) e água, dando origem à carbonatação. Consequentemente dessa reação é a redução do PH do concreto de valores ideais entre 12,6 e 13,5 para números próximos de 8,5. “O problema é que a alteração do pH pode facilitar o desencadeamento da corrosão, já que a alcalinidade é importante para manter o aço do concreto armado protegido” (Tokudome, 2018).

Segundo Cascudo (2011), a carbonatação do concreto, que está associada à ação do CO₂, representa um dos fatores iniciadores mais importantes da corrosão das armaduras e, felizmente, ocorre a uma velocidade lenta, atenuando-se com o tempo.

2.9.2. Manifestação Patológica

A carbonatação manifesta-se inicialmente por depósitos de coloração esbranquiçada na superfície do concreto e fica mais evidente quando surgem fissuras na peça e deslocamento da camada de concreto de recobrimento, Figura 2. A profundidade e a velocidade do fenômeno dependem de características do próprio concreto, como o teor de concreto e o PH. Também dependem das condições de exposição, como alta concentração de gás carbônico e umidade relativa do ar na faixa de 50% a 75%.



Figura 2. Exposição da Armadura Pós Deslocamento do Concreto (ARAKI ENGENHARIA, 2018, s.p.)

A obrigatoriedade da presença de gás carbônico para a carbonatação ocorrer faz com que o fenômeno tenha maior incidência em grandes centros urbanos e em subsolos de garagem, como mostra a Figura 3.



Figura 3. Garagem em Subsolo com incidência de Carbonatação (ARAKI ENGENHARIA, 2018, s.p.)

2.9.3. Cuidados Para Evitar a Carbonatação

Antecedente a concepção dos projetos o profissional deve se ater a algumas normalizações e características da região onde será feita a edificação, como por exemplo, dados apresentados na classificação de agressividade ambiental conforme Tabela 3.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Tabela 3. Identificação das Classes de Agressividade Ambiental (NBR6118 – 2014)

Considerando uma estrutura de concreto propensa a sofrer processo de carbonatação, algumas medidas podem contribuir para diminuir ou mesmo evitar grandes impactos desta manifestação, como por exemplo, resguardar da cura úmida, atenção especial a formação do traço, bem como obedecer rigorosamente a espessura mínima de cobrimento da armadura.

Ao reduzir a quantidade de poros, dosagens com menor relação água cimento terão menores velocidades de carbonatação, podendo ser usados aditivos que proporcionem ainda maior impermeabilidade, bem como o melhor tipo de cura para as estruturas ainda é a cura úmida, com aspersão de água por no mínimo sete dias, especificamente em lajes, sempre que possível, deve-se manter uma camada de água na sua face superior, ou seja, fazer a cura submersa. Os cimentos com menos adições tendem a ser os mais adequados para uma maior vida útil das estruturas sujeitas à carbonatação” (CARMONA, 2017).

A Especialista acrescenta: “Mas é possível fazer um bom concreto, resistente à carbonatação, com todos os tipos de cimento, desde que se lance mão de um bom traço” (Takudome, 2018).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para delineamento desta pesquisa, foi utilizada a seleção dos seguintes autores, Andrade (2002), Gil (2002), Vergara (2004) e Beuren (2004), cujos quais nortearam este projeto nas modalidades de natureza, objetivos, procedimentos técnicos de pesquisa, abordagem do problema, plano de coleta e interpretação de dados.

Com base nessas classificações o presente trabalho seguiu as especificações no intuito de garantir uma padronização, formalização e unificação diante da gama de autores relacionados à metodologia de pesquisa.

Classificada como de natureza aplicada, ou seja, tem caráter embasado em levantamento de dados, ensaios, formulações de cálculos, os quais foram implementados e podem vir a serem aplicados nas obras regionais. Com caráter exploratório e explicativo, levando em consideração que um dos principais objetivos foi verificar a influência da adição da sílica ativa na velocidade da frente de carbonatação do concreto.

Os dados iniciaram com a utilização das pesquisas bibliográficas, de campo e experimental. Na primeira etapa com estudos sobre a dosagem de concretos levando em consideração seus principais constituintes; na segunda, foram realizadas coletas de amostras para ensaios com os materiais preliminares estabelecendo comparativos dentre os resultados, bem como instigação de outros modelos de concretos que permitam melhores interações diante da frente de carbonatação.

O fator que dita se o concreto é o adequado está correlacionado diretamente a maior durabilidade, o atendimento ao serviço ao qual foi programado e de certa forma a viabilidade em sua produção levando em consideração disponibilidade de agregados na produção e o menor gasto de cimento. Dessa forma teve se uma abrangência quantitativa e qualitativa, pois interessou-se uma maior resistência, com menor idade, durabilidade e menor consumo de materiais (cimento, agregados e outros), teve se uso de dados numéricos, bem como interpretações e análises.

Teve início em setembro de 2019 com duração de 2 meses, com a equipe de apoio de um laboratório terceiro especializado em tecnologias do concreto, laboratório

químico, conjunto de professores do IDD-SP, bem como o orientador deste experimento. Foram utilizados ensaios para caracterização dos agregados, assim como ensaios para caracterização do concreto.

Para eficácia nos resultados foram utilizadas as ferramentas do Excel, softwares, prensa eletrônica de rompimento, termômetros, balanças de precisão, vidrarias e equipamentos normatizados, câmara de carbonatação, retífica para superfícies de concreto, paquímetros, câmeras fotográficas, dentre outros dispositivos analógicos. Os resultados foram dispostos em forma de relatório expositivo para interpretação.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E AGLOMERANTES

A caracterização de um material busca transparecer os fenômenos físicos, químicos, mineralógicos ou biológicos de cada um. Esta definição pode se alcançar de várias formas, ficando a mercê de quais características são de relevância para dada situação. Para a determinação das propriedades utilizou-se a padronização conforme normas direcionais de agregados da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT.

3.1.1. Determinação da composição granulométrica

Para determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos utilizou-se a padronização conforme normas direcionais de agregados da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT.

3.1.1.1 Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo

Após coleta de 200 kg areia natural média e pó de pedra, ambos secos, de um determinado lote, Figuras 4 e 5, separado em frações de 40 kg, com auxílio do separador mecânico - quarteador de Jones – Figura 6. Extraíu-se 2 amostras de 500 gramas para

cada agregado, cujas amostras foram colocadas em um agitador mecânico em um sequencial de peneiras milimetradas da escala de 25 / 19 / 9,5 / 4,8 / 2,4 / 1,2 / 0,6 / 0,3 / 0,15 / Fundo, por um tempo de 10 minutos. Posteriormente pesado cada parcela retida em cada peneira.



Figura 4. Areia Natural Média



Figura 5. Pó de Pedra Basáltico



Figura 6. Quarteamento do Agregado Miúdo Fonte: (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Para cálculo de material a adicionar sobre a peneira com malha de diâmetro igual ou superior 4,75 mm deve ser utilizar a equação 01:

$$m = 2,5 \times a \times s \quad (1)$$

onde:

m : é a máxima quantidade de material sobre cada peneira, em quilogramas;

a : é a abertura da malha, em milímetros;

s : é a superfície efetiva de peneiramento, em metros quadrados.

A composição granulométrica do agregado miúdo, bem como o módulo de finura e a dimensão máxima característica do agregado estão fundamentados na NBR NM248:2003. Os materiais a serem utilizados são:

- Baterias de peneira (malha 9,5 mm até a malha 0,15 mm e fundo);
- Balança;
- Escova de cerdas macias.

Para cada uma das amostras de ensaio, calcula-se a porcentagem retida, em massa, em cada peneira, com aproximação de 0,1%. As amostras devem apresentar necessariamente a mesma dimensão máxima característica, e nas demais peneiras, os valores de porcentagem retida individualmente não devem diferir mais que 4% entre si. Caso isto ocorra, repetir o peneiramento para outras amostras de ensaio até atender a esta exigência.

A amostra, previamente seca ao ar, foi então peneirada através da bateria de peneiras, Figura 7, de maneira enérgica e contínua, permitindo a separação dos diferentes tamanhos dos grãos do agregado. Em cada peneira o material retido foi, então, separado e pesado, anotando-se o valor na planilha de composição granulométrica. Os grãos de agregado miúdo que ficaram presos nas malhas das peneiras foram retirados através da passagem da escova de cerdas macias, de modo que nenhuma partícula fosse perdida.



Figura 7. Conjunto de Peneiras para Ensaio Granulométrico de Agregado Miúdo (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Ao final do processo, com todos os valores dos pesos retidos em cada peneira, procede-se a composição da planilha e gráfico de composição granulométrica, definindo-se os percentuais de material retido e retido acumulado. Este percentual em relação a cada peneira da série utilizada forneceu os dados para a definição do módulo de finura e o diâmetro máximo característico do agregado.

O módulo de finura de um agregado calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100. O valor do módulo de finura decresce à medida que o agregado vai se tornando mais fino. Já o diâmetro máximo característico do agregado é definido como a malha da peneira na qual ficou retido acumulado o percentual igual o imediatamente inferior a 5%.

As normas utilizadas como base para realização do ensaio foram às normas:

- NBR NM 26:2001 – Agregados – Amostragem
- NBR NM 27:2001 – Agregados – redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.
- NBR NM 248:2003 – Determinação da composição granulométrica.

3.1.1.2 Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo

Conforme NBR NM 26 foi separada uma amostra de 300 kg de brita 0 e brita 1, em campo, e reduzida para ensaio laboratorial em 75 kg através de quarteamento em superfície limpa e plana. Para determinação da composição granulométrica utilizou-se 10 kg em determinação da NBR NM 248:2003, com as seguintes observações:

- No peneiramento de agregados graúdos, se necessário, experimentar manualmente a passagem de cada um dos grãos pela tela, sem, contudo, fazer pressão sobre esta.
- Bateria de peneiras (mm) 75 / 63 / 50 / 37,5 / 31,5 / 25 / 19 / 9,5 / 4,8 / 2,4 / 1,2 / 0,6 / 0,3 / 0,15 / Fundo.
- Balança de precisão 0,01g.
- Escova de aço.

A amostra foi peneirada através da bateria de peneiras, de maneira enérgica e contínua, permitindo a separação dos diferentes tamanhos de grãos do agregado. Procedeu da mesma forma adotada no agregado miúdo, para obtenção do diâmetro máximo característico e modulo de finura.

3.1.2. Determinação do material fino - passante na peneira 75 μm

3.1.2.1 Determinação do material fino para o agregado miúdo

Para a realização do ensaio do agregado miúdo, foram separadas duas amostras de 500 gramas e efetuou-se a lavagem com água sequencialmente levado para a estufa, com as amostras devidamente secas e sem variação de massa, registra se o peso médio das amostras subtraindo da massa inicial antes da lavagem. Segundo a NBR NM 46 - Determinação do material fino passante através da peneira de 75 μm , por lavagem, Figura 8, os resultados foram obtidos utilizando a equação 02:

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (2)$$

onde:

m : porcentagem de material mais fino que peneira de 75 μ m.

m_i : massa original da amostra seca, em gramas.

m_f : massa da amostra seca após a lavagem, em gramas.



Figura 8. Lavagem de amostra para eliminação de material Fino (75 μ m) (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

3.1.2.1 Determinação do material fino para o agregado graúdo

Para realizar ensaio do agregado graúdo, o mesmo procedimento foi adotado, porém as amostras foram de 5 kg, conforme determina a norma NBR NM 46:2003.

3.1.3. Determinação da massa específica e massa específica aparente

3.1.3.1 Determinação da massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo

A coleta da amostra segue o descrito na norma NBR NM 26 para amostragem de campo e reduzida para ensaios conforme NBR NM27. Com a obtenção de uma amostra

de 1000 gramas por quarteamento, com o agregado miúdo na condição das partículas estarem com uma umidade tal que não se aderiram entre si, efetuou-se a adição ao tronco de cone a fim de parametrizar a umidade ideal conforme norma deste ensaio. O frasco utilizado para o procedimento foi um picnometro de vidro capacidade 500 cm³, Figura 9. Todo o ensaio se fundamentou dentre outras na norma NBR NM 52:2009, com as equações 03 e 04:

$$di = \frac{m}{v - va} \quad (3)$$

onde:

di: Massa específica aparente do agregado com superfície seca, em g/cm³;

m: Massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V: volume do frasco, em cm³.

$$va = \frac{m2 - m1}{\rho a} \quad (4)$$

onde:

va : volume de água adicionada ao Frasco, em cm³;

m2: Massa total (agregado+água+ frasco), em gramas;

m1 : Massa total (frasco + agregado), em gramas.

ρa: Massa específica da água, em gramas por centímetros cúbicos.



Figura 9. Pesagem do Conjunto Frasco e Agregado Miúdo (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

3.1.3.2 Determinação da massa específica e massa específica aparente do agregado graúdo

Após redução da amostra dos lotes de agregados graúdos, Figuras 10 e 11, para 4 kg (NM 26 / NM 27), retido em peneira malha 4,75 mm, seguindo os parâmetros da NBR NM 53:2009. Massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, sem considerar os poros permeáveis à água. Massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis à água. As determinações de volume são feitas na balança hidrostática, pela diferença de massa do material ao ar e submerso. Absorção é o aumento de massa do agregado devido ao preenchimento de seus poros permeáveis por água, expressa em porcentagem de sua massa seca. Todas as propriedades são importantes na dosagem de concretos. Para realização do ensaio foram utilizados os seguintes materiais:

- Balança capacidade 10 kg, resolução 0,1g;
- Tanque com água;
- Cesto com malha menor ou igual 3,35 mm;
- Peneira com malha 4,75 mm;

- Balde plástico 20 litros;
- Flanela.

Após coletar amostra do agregado efetuou-se o peneiramento na malha 4,75 mm e colocado no balde por 24 horas submerso em água. Subsequente foi secado todo o agregado com auxílio de flanela limpa, Figura 12, deixando o na condição de saturado superfície seca (S.S.S.), efetuando pesagem de amostras.



Figura 10. Brita 0



Figura 11. Brita 1

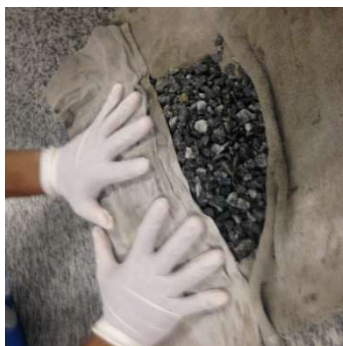


Figura 12. Processo de Secagem da Umidade Superficial do Agregado (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Com o cesto submerso em água efetuou-se a pesagem das amostras submersas, Figura 13. Posteriormente submetido às amostras para secagem em estufa até a constância da massa, a fim de obter valor da absorção d'água após pesagem do agregado na condição de seco e frio.

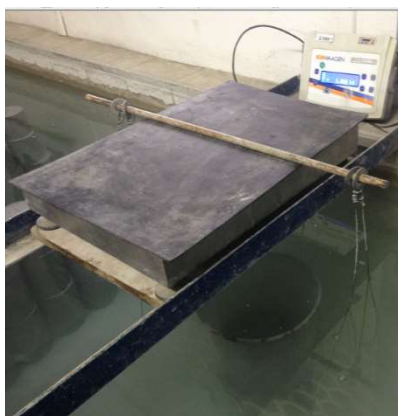


Figura 13. Balança e Recipiente para Registro de Massa Submersa (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

3.1.4. Determinação da absorção de água

3.1.4.1 Determinação da absorção de água do agregado miúdo

O aumento da massa do agregado devido ao preenchimento dos seus poros por água, expressa como porcentagem de sua massa seca (em estufa). Utilizando o descrito na NBR NM 30:2001, calcula-se com a equação 05:

$$A = \frac{ms - m}{m} \times 100 \quad (5)$$

onde:

ms: massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

m: massa da amostra seca em estufa, em gramas;

A: absorção de água, em porcentagem.

Os materiais utilizados para realização do ensaio foram:

- Tronco-cônico metálico;
- Bandeja metálica;
- Haste de compactação (340g, 25mm de diâmetro);

- Estufa;
- Espátula metálica.

Com a amostra na condição seca, submergiu toda amostra em água por 24 horas. Retirou a amostra da água e estendeu sobre uma superfície plana, submetendo a ação de uma suave corrente de ar quente, revolvendo a amostra com frequência para assegurar uma secagem uniforme. Prosseguiu a secagem até que os grãos de agregado miúdo não ficassem aderidos entre si de forma marcante. Com o tronco-cônico colocou-se a amostra sem comprimi-la, mas com uma compactação suave de 25 golpes, retirou o molde verticalmente, como a amostra, cuja qual desmoronou sem marcar forma exata, Figura 14. Essa é a condição de saturada superfície seca.



Figura 14. Ensaio de Agregado Miúdo com o Tronco-cônico (Autor, apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

3.1.4.2 Determinação da absorção de água do agregado graúdo

Com base na NBR NM 30:2001, foram coletadas as amostras do agregado, onde as mesmas foram colocadas no balde por 24 horas submerso em água. Subsequente foi retirado o excesso de água todo o agregado com auxílio de flanela limpa, deixando o na condição de saturado superfície seca (S.S.S.), efetuando pesagem de amostras. Posteriormente submetido às amostras para secagem em estufa até a constância da massa seca, a fim de obter valor da absorção d'água após pesagem do agregado na condição seco e frio.

3.1.5. Massa unitária

Procedimento realizado conforme norma NBR NM 45:2006 método A, através da equação 06, elaborada para agregados secos, executa-se a pesagem até atingir uma constância da massa:

$$\rho_{ag} = \frac{ma - mr}{v} \quad (6)$$

onde:

ρ_{ag} : massa unitária do agregado, em quilogramas por metro cúbico;

ma : massa do agregado, em quilogramas;

mr : massa do recipiente mais agregado, em quilogramas;

v : volume do recipiente, em metros cúbicos.

Os materiais utilizados para realização do ensaio foram:

- Balança resolução de 50g;
- Haste metálica cilíndrica;
- Concha metálica;
- Recipiente metálico.

Após definir e pesar o recipiente procedeu com a adição do agregado em três camadas distintas sendo na primeira (1/3 da capacidade), realizou se 25 golpes de adensamento sem colidir ao fundo do recipiente, segunda camada (2/3 capacidade) de agregado com sequência de 25 golpes sem atingir a primeira camada, conforme Figura 15, por fim completou todo o recipiente com mais 25 golpes e efetuou-se o arrasamento da superfície com face do recipiente. Após o registro do peso conjunto agregado mais recipiente, repetiu-se o processo no estado solto, ou seja, sem efetuar adensamento,

apenas encheu-se o recipiente e o arrasamento da superfície, com subsequente registro de peso. Substituindo na equação evidencia a massa unitária.



Figura 15. Ensaio de Massa Unitária para Agregado Miúdo (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Nota: Procedimento adotado para agregado miúdo e graúdo.

3.1.6. Volume de vazios

Os poros dos solos, que apesar de também serem chamados de volume de vazios, podem estar preenchidos com água (quando solo está saturado), com ar (quando o solo está totalmente seco) ou com ambos, que é a forma mais comum encontrada na natureza. Para definição do índice de vazios, utilizou se a equação 7, em respaldo a MN45:2006:

$$Ev = \frac{100(di \times \rho_w) - \rho_{ag}}{di \times \rho_w} \quad (7)$$

onde:

Ev : índice de volume de vazios nos agregados, em porcentagem;

di : massa específica relativa do agregado seco;

ρ_w : massa específica da água, em quilogramas por metro cúbicos;

ρ_{ag} : massa unitária média do agregado, em quilogramas por metro cúbicos.

Nota: Dados obtidos a partir da massa unitária calculada no item 3.1.5. Procedimento adotado para agregado miúdo e graúdo.

3.1.7. Módulo de finura do cimento

Reunidos todos os materiais, inicialmente, pesou-se 50 g do cimento a ser analisado. Esse material foi colocado na peneira de malha 0,075 mm com seu respectivo fundo. Iniciou-se o processo de peneiramento contínuo do cimento, permitindo que todo o material se espalhasse por igual na tela da peneira para facilitar o peneiramento. Esse processo foi realizado através de movimentos na direção horizontal, sendo a peneira constantemente girada de forma que todo o material fosse peneirado por igual.

Após, colocou-se a tampa no conjunto e imprimiu-lhe um peneiramento contínuo, Figura 16, estando a peneira ligeiramente inclinada, dando-se cerca de 25 golpes com a palma da mão na peneira e girando-a ao fim disso, até um total de 150 golpes.

Realizado esse processo, retirou-se o material retido na peneira, limpando-a com o pincel de forma não perder material pesando-se o cimento em seguida. Todos os procedimentos descritos acima foram repetidos até que o peso do cimento que passou na peneira registrou um valor inferior a 0,05 g, para cálculo utilizou-se a equação 08.

$$f = \frac{RC}{M} \times 100 \quad (8)$$

onde:

F : Módulo de finura em porcentagem;

R : Massa retida na peneira em gramas;

M : Peso da amostra em gramas;

C : Fator de correção da peneira utilizada no ensaio

Os ensaios foram realizados conforme o método de ensaio, MB-3432 - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 μ m (nº 200) - NBR 11579. Ensaio realizado para o cimento em estudo, neste caso adotado o CP II-F 40 (maior teor pozolânico e disponibilidade).

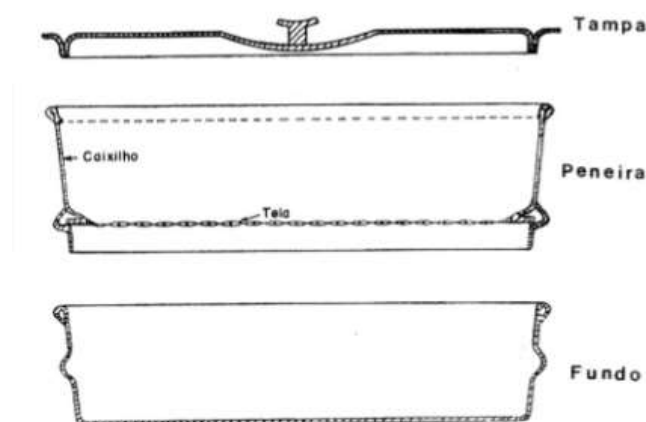


Figura 16. Conjunto de Peneira para ensaio de módulo de finura do Cimento (ABNT-NBR11579. 1991, p.02)

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

A caracterização do concreto no estado fresco e endurecido é um conjunto de dados que permitem definir condições de viabilidade na utilização dos materiais e estabelecer comparativos de melhor eficácia em sua empregabilidade. Para efeito de parametrização foram consideradas as seguintes relações:

- Teor de argamassa: 0,53;
- Slump teste: 100 ± 20 mm;
- Mesmo lote de agregados;
- Cura úmida para os corpos de provas;
- Único cimento com uma série de 12 traços diferentes, conforme Tabela 12.

Os componentes da mistura foram pesados, ou seja, traços executados com unidade de medida em massa. A mistura foi feita no misturador mecânico (misturador alemão), onde os componentes foram inseridos na ordem de agregado graúdo, água, aglomerante e areia até a formação de uma pasta homogênea. Foi registrada hora em

que o cimento entra em contato com a água. Após a adição de todos os componentes e sem paralisar a operação de mistura e permaneceu assim 5 minutos, a partir deste momento realizou o teste de abatimento no tronco de cone (slump), registros de temperatura e umidade local, bem como temperatura do concreto fresco.

Logo após foi realizado a moldagem dos corpos de prova para realização do ensaio de resistência a compressão. Onde, previamente o dispositivo de fechamento das formas foi apertado e usou-se desmoldante para facilitar o desmolde dos corpos de prova na superfície interna da forma, efetuada pesagem de 4 (quatro) formas vazias para após moldados corpos de prova pesá-las novamente para conclusão de ar incorporado e massa específica real do concreto.

Imediatamente após a adequação das formas foram moldados 4 (quatro) corpos de prova para cada uma das 12 séries, a colocação do concreto na forma foi feita com o auxílio da concha em 2 (duas) camadas de alturas aproximadamente iguais recebendo cada camada 12 (doze) golpes uniformes com haste metálica normal de forma que os golpes sejam uniformemente distribuídos sobre a superfície da camada. Logo depois do adensamento das camadas foi feito o razoamento do topo dos corpos de prova com o auxílio de uma colher de pedreiro. Após a moldagem os corpos de prova foram levados para bancada, devidamente identificados onde aproximadamente 24 horas depois foram desmoldados e identificados em séries para a idade estabelecida, conforme Figura 17.



Figura 17. Corpos de Provas 10x20 cm (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

A fim de aprimorar os resultados e em conformidade com a norma NBR 5738:2008, procedimentos para cura e moldagem de corpos de provas, para efeito de

estudo, os concretos permaneceram por 120 dias entre cura úmida e estabilização de umidade.

Após o cumprimento das datas, horas antes do rompimento dos corpos de provas foram feitas a retificação das extremidades com auxílio de uma máquina elétrica com um rebolo metálico acoplado, deixando-os com perfeito acabamento para utilização na prensa para teste de resistência a compressão, (Figura 18). E os demais concretos que foram adicionados a câmara de carbonatação, ficaram em temperatura ambiente durante 30 dias, para o devido controle de umidade na estrutura dos CP's.



Figura 18. Prensa Hidráulica (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

3.2.1. Consistência do concreto (Slump Test)

Para realização do ensaio de consistência do concreto, primeiramente foi feita a limpeza e umidificação do molde e posteriormente foi colocado sobre a placa metálica, igualmente limpa e umedecida. Com o molde fixo pelos pés do operador, Figura 19, foi realizado o preenchimento, onde dividiu-se o molde em três camadas de concreto em volumes iguais, com o auxílio do complemento tronco-cônico, sendo que a última foi preenchida totalmente. Cada camada foi adensada com 25 golpes da haste de 16mm de diâmetro, distribuídos uniformemente e após o adensamento, foi retirado o

complemento tronco-cônico, remove-se o excesso de concreto com o auxílio da colher de pedreiro, limpando-se após isto, a placa metálica em torno do molde. Foi elevado o molde pelas alças, levantando-o pela posição vertical, com velocidade constante, num tempo de $(8 \pm 2s)$ e depois foi utilizado o molde invertido juntamente com uma trena para anotação dos resultados que são expressos em mm.

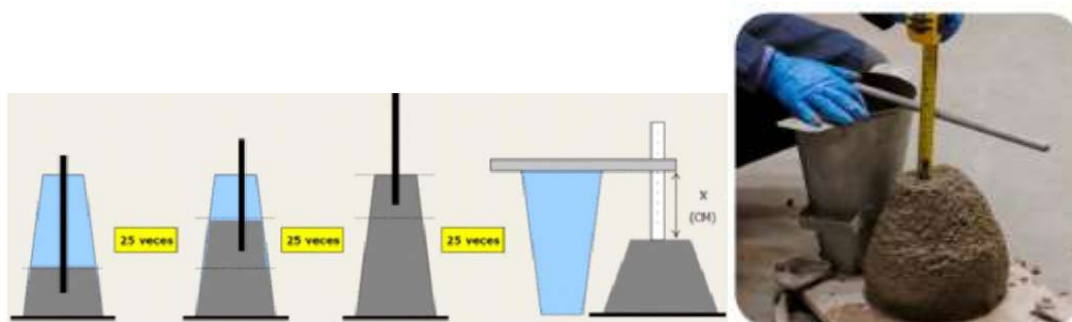


Figura 19. Representação Esquemática do Slump Test (SERAFIM, 2013, s.p.)

3.2.2. Tempos de pega do concreto

Os tempos de pega referem-se às etapas do processo de endurecimento, solidificação ou enrijecimento do cimento e, em consequência, do concreto. Conhecidos também como perda de plasticidade, perda de trabalhabilidade ou ainda cristalização. As reações com aluminatos ocorrem primeiro e são as responsáveis pela perda da consistência e pela pega. Já as reações com os silicatos respondem pelo endurecimento e ganho de resistência mecânica em idades posteriores, (METHA, MONTEIRO, 2008).

Todos os procedimentos de definições destes tempos são descritos na NBR NM 65:2003 e NM 43:2003, Cimento Portland - determinação do tempo de pega e Cimento Portland - determinação de consistência normal respectivamente.

Para este ensaio é utilizado um equipamento conhecido como aparelho de vicat, composto por um suporte milimetrado e agulhas, onde se registra tempo de pega inicial e final. Os resultados destes testes devem estar inseridos nos parâmetros estipulados por normas para sua classificação e utilização no mercado.

3.2.3. Resistência à compressão

Para realização dos ensaios de resistência a compressão, primeiramente foi moldado e preparados os corpos de prova, como já comentado anteriormente. Logo após foi calculado a área das duas faces de trabalho do corpo-de-prova (que ficam em contato direto com os apoios da prensa), cuja média é a área de trabalho a ser utilizada no cálculo. Em seguida, foram colocados os corpos-de-prova na prensa, de forma que a força aplicada seja na direção de conformação da peça da amostra. O aumento da carga deve ser de $(1,0 \pm 0,1)$ Mpa/s e o valor da carga máxima aplicada até a ruptura do corpo-de-prova foi anotado em uma planilha.

A Resistência à compressão a temperatura ambiente (RCTA) é expressa em megapascals, com uma casa decimal, calculada por meio da equação 9:

$$RCTA = \frac{P}{A} \quad (9)$$

onde:

P : É a carga atingida no momento da ruptura, em newtons;

A : É a área de trabalho, em milímetros quadrados.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos resultados dos ensaios característicos dos agregados e aglomerantes, tornou-se possível o desenvolvimento de um traço inicial com intuito de criar uma parametrização da água de amassamento para um dado fator água/cimento. Abaixo as informações alcançadas com os ensaios dos materiais, bem como traços utilizados.

4.1. PROPRIEDADES DO AGREGADO MIÚDO

Conforme ensaio de caracterização realizada no laboratório de concreto dispôs-se dos seguintes resultados para granulometria da areia natural, Tabelas 4 e 5.

Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)		Porcentagem retida (%)				% retida acumulada
	M ₁	M ₂	M ₁	M ₂	Média		
9,5	0,00	0,00	0,0	0,0	✓	0,0	0
6,3	3,50	2,30	0,7	0,5	✓	0,6	1
4,75	2,30	4,80	0,5	1,0	✓	0,7	1
2,36	9,50	12,50	1,9	2,5	✓	2,2	4
1,18	30,50	36,80	6,0	7,3	✓	6,7	10
0,600	196,80	188,45	38,8	37,3	✓	38,1	48
0,300	195,70	190,20	38,6	37,7	✓	38,1	86
0,150	54,70	53,90	10,8	10,7	✓	10,7	97
Fundo	14,00	15,70	2,8	3,1	✓	2,9	100
Massa inicial (g)	507,10	505,20	Zona granulométrica				Areia
Massa final (g)	507,00	504,65	Dimensão máxima característica				2,36 mm
Diferença (%)	✓ 0,02	✓ 0,11	Módulo de finura				2,47

Tabela 4. Composição Granulométrica da Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	RESULTADO
Massa específica seca	ABNT NM 52/09	g/cm ³	2,60
Massa específica S.S.S.	ABNT NM 52/09	g/cm ³	2,61
Massa específica	ABNT NM 52/09	g/cm ³	2,63
Massa unitária no estado solta	ABNT NM 45/06	g/cm ³	1,37
Massa unitária no estado solta S.S.S.	ABNT NM 45/06	g/cm ³	1,37
Volume de vazios no estado solto	ABNT NM 45/06	%	47
Massa unitária no estado compactado	ABNT NM 45/06	g/cm ³	1,52
Massa unitária compactada S.S.S.	ABNT NM 45/06	g/cm ³	1,52
Volume de vazios compactado	ABNT NM 45/06	%	42
Absorção de água	ABNT NM 30/01	%	0,3

Tabela 5. Síntese dos Resultados de Ensaio da Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Conforme apresentada na tabela e de acordo com a zona granulométrica, este agregado é classificado comercialmente como areia média, com módulo de finura compreendido entre 2,20 a 2,90. Sendo sua dimensão máxima característica apresentada na malha 2,36 mm. A tabela 6 apresenta os valores referentes à granulometria do pó de pedra.

Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)		Porcentagem retida (%)				% retida acumulada
	M ₁	M ₂	M ₁	M ₂	Média		
9,5	0,00	0,00	0,0	0,0	✓	0,0	0
6,3	0,00	0,00	0,0	0,0	✓	0,0	0
4,75	3,58	1,89	0,7	0,4	✓	0,5	1
2,36	110,23	106,58	21,9	21,3	✓	21,6	22
1,18	84,15	90,36	16,7	18,0	✓	17,4	40
0,600	95,63	90,41	19,0	18,0	✓	18,5	58
0,300	86,39	85,74	17,2	17,1	✓	17,1	75
0,150	60,21	53,67	12,0	10,7	✓	11,3	86
Fundo	62,81	72,46	12,5	14,5	✓	13,5	100
Massa inicial (g)	504,12	502,07	Zona granulométrica				Areia
Massa final (g)	503,00	501,11	Dimensão máxima característica				4,75 mm
Diferença (%)	✓ 0,22	✓ 0,19	Módulo de finura				2,82

Tabela 6. Composição Granulométrica do Pó de Pédra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Para o pó de pedra ainda que com dimensão máxima característica de 4,75 mm se enquadra como uma areia artificial de classe média com módulo de finura de 2,82 mm. A tabela abaixo, Tabela 7 mostra o resumo dos ensaios aplicados ao agregado miúdo pó de pedra.

Ensaio	Metodologia	Un.	Resultado
Massa específica seca	ABNT NM 52/09	g/cm ³	2,77
Massa específica S.S.S.	ABNT NM 52/09	g/cm ³	2,79
Massa específica	ABNT NM 52/09	g/cm ³	2,85
Massa unitária no estado solta	ABNT NM 45/06	g/cm ³	1,61
Massa unitária no estado solta S.S.S.	ABNT NM 45/06	g/cm ³	1,62
Volume de vazios no estado solto	ABNT NM 45/06	%	42
Massa unitária no estado compactada	ABNT NM 45/06	g/cm ³	1,88
Massa unitária compactada S.S.S.	ABNT NM 45/06	g/cm ³	1,89
Volume de vazios compactado	ABNT NM 45/06	%	32
Absorção de água	ABNT NM 30/01	%	0,7

Tabela 7. Síntese dos Resultados de Ensaio do Pó de Pedra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

De acordo com a NBR NM 46, materiais pulverulentos são partículas minerais com dimensão inferior a 0,075 mm, o excesso deste material prejudica a aderência entre a pasta de cimento e a argamassa, aumenta o consumo de água devido à alta superfície específica, acarretando retração e diminuição da resistência de concretos e argamassa, para tanto foi realizado ensaio de material passante através da peneira de 75 µm, Tabelas 8 e 9 para areia natural e pó de pedra respectivamente.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Mat. fino 75µm	Diferença (%)	Média mat. fino 75µm
1	512,40	506,30	1,19%	✔ 0,31%	1,0%
2	508,60	504,10	0,88%		Lavagem com água

Tabela 8. Material Passante Através da Peneira 75µm Para Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Mat. fino 75µm	Diferença (%)	Média mat. fino 75µm
1	505,41	464,25	8,14%	✔ 0,39%	7,9%
2	501,78	462,89	7,75%		Lavagem com água

Tabela 9. Material Passante Através da Peneira 75µm Para Pó de Pedra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

O ensaio de determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados foi realizado com sucesso e ressaltamos a grande importância do mesmo para que não venha comprometer a qualidade do concreto. A norma estabelece para o agregado miúdo um teor máximo de 3,0% para concreto sujeito ao desgaste superficial, e 5,0% para outros concretos; com isso afirmamos que a areia natural utilizada apresentou sua média igual a 1,0% estando então dentro do limite permitido pela norma, e neste caso o mesmo pode ser utilizado tanto para concreto sujeito ao desgaste superficial como para outros concretos, quanto ao pó de pedra utilizado fazendo as ponderações devido excesso de finos e absorção de água.

A massa específica absoluta é utilizada na transformação de massa para volume absoluta sem vazios. Na fórmula de cálculo do consumo de cimento em peso por metro cúbico de concreto utilizam massa específica absoluta. A massa específica também é utilizada para classificação do agregado quanto à densidade, Tabelas 10 e 11, sendo para areia natural e pó de pedra respectivamente.

NBR NM 52 - Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente			
Amostra	1	2	Massa específica seca
M_s - Massa do agregado saturada superfície seca (g)	500,00	500,00	2,600 g/cm³
M₁ - Massa do conjunto (frasco + agregado) (g)	733,50	732,80	Massa específica S.S.S
M₂ - Massa total (frasco + agregado + água) (g)	1.038,90	1.038,50	
M - Massa do agregado seco em estufa (g)	498,70	498,30	Massa específica
V - Volume do frasco (ml)	497,38	497,38	2,630 g/cm³

Tabela 10. Massa Específica e Massa Específica Aparente da Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

NBR NM 52 - Determinação Da Massa Específica e Massa Específica Aparente			
Amostra	1	2	Massa específica seca
M_s - Massa do agregado saturada superfície seca	500,00	500,00	2,770 g/cm³
M₁ - Massa do conjunto (frasco + agregado) (g)	764,81	765,13	Massa específica S.S.S.
M₂ - Massa total (frasco + agregado + água) (g)	1.084,78	1.084,36	
M - Massa do agregado seco em estufa (g)	496,82	496,39	Massa específica
V - Volume do frasco (ml)	498,56	498,56	2,850 g/cm³

Tabela 11. Massa Específica e Massa Específica Aparente do Pó de Pedra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Os resultados de ensaios realizados com a mesma amostra não devem diferir em mais de 0,02 g/cm³ para a massa específica. Tomar como valor definitivo a média dos valores correspondentes obtidos e registrar com aproximação de 0,01 g/cm³. Para o ensaio da areia foi obtido massa específica 2,630 g/cm³, massa específica seca 2,600g/cm³ e para o ensaio do pó de pedra foi obtido massa específica 2,850 g/cm³, massa específica seca 2,770g/cm³.

Conhecer a quantidade de água a ser absorvida pelo agregado, Tabelas 12 e 13, respectivamente para areia natural e pó de pedra, torna-se mais preciso e facilita a formulação de sua porcentagem em seu quantitativo na formação do concreto.

NBR NM 30 - Determinação da Absorção de água

Absorção 1:	0,26%	Absorção 2:	0,34%	Diferença:	🟢 0,08%	Absorção média:	0,3%
-------------	-------	-------------	-------	------------	---------	------------------------	-------------

Tabela 12. Absorção de Água da Areia Natural (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

NBR NM 30 - Determinação da Absorção de Água

Absorção 1:	0,64%	Absorção 2:	0,73%	Diferença:	🟢 0,09%	Absorção média:	0,7%
-------------	-------	-------------	-------	------------	---------	------------------------	-------------

Tabela 13. Absorção de Água do Pó de Pedra (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Nota: Para efeito de cálculo foi considerado absorção média de 0,3% para a areia natural e 0,7% para o pó de pedra.

4.2. PROPRIEDADES DO AGREGADO GRAÚDO

A composição granulométrica do agregado graúdo, bem como o módulo de finura e a dimensão máxima característica do agregado foram calculados conforme Tabelas 14 e 15, para brita 0 e brita 1 respectivamente, nas proporções retidas no sequencial de peneiras.

Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)		Porcentagem retida (%)			% retida acumulada	
	M ₁	M ₂	M ₁	M ₂	Média		
75	0,00	0,00	0,00	0,00	✓ 0,0	0	
63	0,00	0,00	0,00	0,00	✓ 0,0	0	
50	0,00	0,00	0,00	0,00	✓ 0,0	0	
37,5	0,00	0,00	0,00	0,00	✓ 0,0	0	
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	✓ 0,0	0	
25	0,00	0,00	0,00	0,00	✓ 0,0	0	
19	0,00	0,00	0,00	0,00	✓ 0,0	0	
12,5	26,50	14,80	0,53	0,30	✓ 0,4	0	
9,5	294,20	302,90	5,88	6,05	✓ 6,0	6	
6,3	1.998,60	2.006,50	39,93	40,10	✓ 40,0	46	
4,75	1.587,10	1.581,40	31,71	31,61	✓ 31,7	78	
2,36	803,90	812,40	16,06	16,24	✓ 16,2	94	
Fundo	295,30	285,30	5,90	5,70	✓ 5,8	100	
Massa inicial (g)	5.006,30	5.004,90	Zona granulométrica				4,75/12,5
Massa final (g)	5.005,60	5.003,30	Dimensão máxima característica				12,50 mm
Diferença (%)	✓ 0,01	✓ 0,03	Módulo de finura				5,54

Tabela 14. Composição Granulométrica da Brita 0 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)		Porcentagem retida (%)				% retida acumulada (%)
	M ₁	M ₂	M ₁	M ₂	Média		
75	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0
63	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0
50	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0
37,5	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0
25	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0
19	0,00	0,00	0,00	0,00		0,0	0
12,5	1.324,00	1.352,10	26,47	27,01		26,7	27
9,5	2.545,20	2.526,90	50,89	50,49		50,7	78
6,3	1.051,20	1.044,70	21,02	20,87		20,9	99
4,75	36,90	29,60	0,74	0,59		0,7	100
2,36	1,00	1,50	0,02	0,03		0,0	100
Fundo	42,80	50,20	0,86	1,00		0,9	100
Massa inicial (g)	5.002,60	5.007,10	Zona granulométrica				9,5/25
Massa final (g)	5.001,10	5.005,00	Dimensão máxima característica				19,00 mm
Diferença (%)	 0,03	 0,04	Módulo de finura				6,78

Tabela 15. Composição Granulométrica da Brita 1 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

De acordo com a zona granulométrica este agregado é classificado comercialmente como brita 0 (4,75 a 12,5 mm), com módulo de finura compreendido em torno de 5,54. Sendo sua dimensão máxima característica apresentada na malha

12,5mm. Bem como brita 1 (9,5 a 25 mm), com módulo de 6,78 mm e dimensão máxima característica de 6,78 mm.

Assim como no agregado miúdo o material pulverulento deve ser também controlado para agregado graúdo, conforme Tabelas 16 e 17 de material fino passante através da peneira de 75 μm .

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Mat. fino 75 μm	Diferença (%)	Média mat. fino 75 μm
1	2.512,00	2.478,00	1,35%	✔ 0,24%	1,2%
3	2.509,00	2.481,00	1,12%		<i>Lavagem com água</i>

Tabela 16. Material Fino Passante Através da Peneira 75 μm para a Brita 0 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Mat. fino 75 μm	Diferença (%)	Média mat. fino 75 μm
1	2.510,40	2.481,70	1,14%	✔ 0,04%	1,1%
2	2.512,00	2.484,30	1,10%		<i>Lavagem com água</i>

Tabela 17. Material Fino Passante Através da Peneira 75 μm para a Brita 1 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

A diferença obtida nas duas determinações não deve ser maior que 0,5%, bem como o máximo permitido por norma de material pulverulento para agregados graúdos é de 10%. Este material se encontra em perfeitas condições de utilização para tal concreto apresentado 1,2% e 1,1 % respectivamente para a brita 0 e 1.

Conforme citado em nota das Tabelas 10 e 11, são aplicados também para a massa específica dos agregados graúdos, (Tabelas 18 e 19).

Amostra	1	2	Massa específica (g/cm ³)			Absorção (%)
M_s - Massa do agregado saturada superfície seca (g)	3.004,00	3.002,00	Seca	S.S.S.	Aparente	
M_a - Massa do agregado submerso em água (g)	1.962,00	1.961,00	2,850	2,880	2,950	1,2
M - Massa do agregado seco em estufa (g)	2.968,00	2.967,00	✔	✔	✔	✔

Tabela 18. Massa Específica, Massa Especifica Aparente e Absorção da Brita 0 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Amostra	1	2	Massa específica (g/cm ³)			Absorção (%)
M_s - Massa do agregado saturada superfície seca (g)	3.002,00	3.000,00	Seca	S.S.S.	Aparente	
M_a - Massa do agregado submerso em água (g)	1.974,00	1.973,00	2,900	2,920	2,960	0,7
M - Massa do agregado seco em estufa (g)	2.981,00	2.982,00	✓	✓	✓	✓

Tabela 19. Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção da Brita 1 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Para a elaboração do concreto será considerada a massa específica de 2,850g/cm³ e 2900 g/cm³ para a brita 0 e brita 1 respectivamente, conforme apresentado em tabela. Além de outras propriedades de grande relevância, a massa unitária do agregado graúdo possibilita pré-definir as proporções para alterações de unidade de medidas do traço, apresentados nas Tabelas 20 e 21 as massas unitárias e índices de vazios, sendo adotado o índice de vazios de 47% para agregados graúdos e massa unitária de 1,52g/cm³ e 1,55 g/cm³ para brita 0 e brita 1 respectivamente.

Condição das amostras	Solto		Compactado	
Amostra	1	2	1	2
M_r - Massa do recipiente (g)	6.500	6.500	6.500	6.500
M_{ar} - Massa do conjunto (recipiente + agregado) (g)	21.956	21.980	23.817	23.925
V - Volume do recipiente (L)	10,20	10,20	10,20	10,20
Massa unitária do agregado (g/cm ³)	✓	1,52	✓	1,70
Massa unitária do agregado na condição S.S.S.(g/cm ³)		1,54		1,72
Índice de volume de vazios (%)		47		40

Tabela 20. Massa Unitária e Índice de Vazios da Brita 0 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Condição das amostras	Solto		Compactado	
Amostra	1	2	1	2
M_r - Massa do recipiente (g)	6.500	6.500	6.500	6.500
M_{ar} - Massa do conjunto (recipiente + agregado) (g)	22.306	22.345	23.618	23.598
V - Volume do recipiente (L)	10,20	10,20	10,20	10,20
Massa unitária do agregado (g/cm ³)	✓	1,55	✓	1,68
Massa unitária do agregado na condição S.S.S.(g/cm ³)		1,56		1,69
Índice de volume de vazios (%)		47		42

Tabela 21. Massa Unitária e Índice de Vazios da Brita 1 (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

4.3. MÓDULO DE FISSURA E TEMPO DE PEGA DO CIMENTO

O processo de Modo de Finura (Mf) e tempo de Pega inicial e final (Pi, Pf), foram realizados com apoio do laboratório químico, sendo os seguintes resultados exibidos na Tabela 22. As tolerâncias referenciadas na tabela são com base nas normas NBR 5733, NBR 5737 e NBR 11578.

ANÁLISE	CP II F-40
Módulo de finura (%)	0,2 Tolerância ≤ 10
Tempo de pega inicial (mm)	220 Tolerância ≥ 60
Tempo de pega final (mm)	310 Tolerância ≤ 600

Tabela 22. Módulo de Finura, Tempo de pega Inicial e Final do Cimento (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

4.4. DOSAGEM DE CONCRETO ADOTADA PARA REALIZAÇÃO DOS ESTUDOS

De posse dos dados obtidos com a caracterização dos materiais utilizados para formação do concreto, obteve-se as dosagens, divididas em 3 grupos compostos por relação a/c (água / cimento) diferentes, bem como variação dos teores de sílica de zero a quinze por cento (0 – 15%), totalizando 12 traços distintos, bem como foram parametrizados criando bases para os constituintes padrão, diferindo apenas os teores de aglomerantes, conforme Tabelas 23 e 24 respectivamente.

Dados	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5	Traço 6	Traço 7	Traço 8	Traço 9	Traço 10	Traço 11	Traço 12
Relação Água /Cimento (A/C)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,55	0,55	0,55	0,55	0,65	0,65	0,65	0,65
Teor de Argamassa (%)	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
Teor de Silica (%)	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15
Slump test (mm)	90	95	90	95	90	90	95	90	90	95	90	90
Resistencia a Compressão F _{C120} dias (Mpa)	51,90	50,30	48,15	47,75	42,06	41,42	40,20	35,52	32,32	32,10	30,61	29,50

Tabela 23. Concretos Reproduzidos e seus respectivos resultados (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Material	Massa Específica (kg/m³)	Massa Unitária (kg/m³)	Módulo Finura	Diametro Máximo (mm)	Materiais Pulverulentos (%)	Absorção (%)	Umidade (%)	Descrição	Quantidade (%)
Aglomerante A	3.040	1,61	-	-	-	-	-	Cimento CP II F-40	100
Aglomerante B	2.220	-	-	-	-	-	-	Silica Ativa	-
Agregado miúdo A	2.630	1,37	2,47	2,4	1,0	0,3	0,0	Areia Natural Média	80,0
Agregado miúdo B	2.850	1,61	2,82	4,8	7,9	0,7	0,0	Pó de Pedra Calcarico	20,0
Agregado graúdo A	2.850	1,52	5,54	12,5	1,2	1,2	0,0	Brita 0 Calcarica	35,0
Agregado graúdo B	2.900	1,55	6,78	19,0	1,1	0,7	0,0	Brita 1 Calcarica	65,0

Tabela 24. Características dos Materiais Constituintes do Concreto Padrão (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

As dosagens reproduzidas de acordo com as características desejáveis dos concretos, bem como defronte aos ensaios qualitativos dos materiais base, foram elaboradas as seguintes proporções dispostas na tabela 25.

Materiais	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5	Traço 6	Traço 7	Traço 8	Traço 9	Traço 10	Traço 11	Traço 12
Cimento (kg)	477	451	431	413	389	370	357	352	326	316	305	297
Silica Ativa (kg)	0	24	48	73	0	19	40	62	0	17	34	52
Areia Natural (kg)	517	517	506	482	612	607	592	563	654	641	630	610
Pó de Pedra (kg)	140	140	137	131	166	164	160	152	177	174	171	165
Brita 0 (kg)	355	357	356	351	369	369	367	362	369	367	366	363
Brita 1 (kg)	670	674	673	663	697	697	694	685	698	694	692	686
Água (l)	215	214	216	219	214	214	218	228	212	217	221	227

Tabela 25. Características dos Materiais Constituintes do Concreto Padrão (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Em continuidade do processo, após 90 dias de produzidos e em cura úmida, estes concretos (corpos de prova) permaneceram em temperatura ambiente por mais 30 dias a fim de corrigir a umidade do seu interior. Ao final deste prazo foram direcionados para o laboratório cujo qual seriam submetidos à exposição de CO₂ em câmara específica. Para maior assertividade foi feito controle de densidade almejando estabilidade da

umidade interna dos concretos, desejável que em um prazo de 24 horas a massa obtenha variação de máximo 0,25%,(caso ultrapasse, a amostra permanece em temperatura ambiente e um novo controle deve ser feito no dia seguinte), o descumprimento deste item pode alterar as características finais do ensaio de carbonatação acelerada.

Os concretos permaneceram na câmara de carbonatação sob exposição de gás carbônico em uma concentração de 5%, teor de umidade de 65% e temperatura controlada de 23°C por um período de 8 semanas ininterruptas, 10/09/19 a 05/11/19, conforme figura 20. A cada semana foi realizado o corte das peças em forma de discos (3cm de espessura) e a medição do possível avanço da frente de carbonatação através da solução de fenolftaleína, figura 21, com auxílio de um paquímetro digital. Todo este processo foi correlacionado com a norma Britânica BS EN 14630:2006 Products and systems for the protection repair of concrete structures – Test methods- Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method e métodos internos da instituição certificada para execução do ensaio.



Figura 20. Câmara de Carbonatação de concretos (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

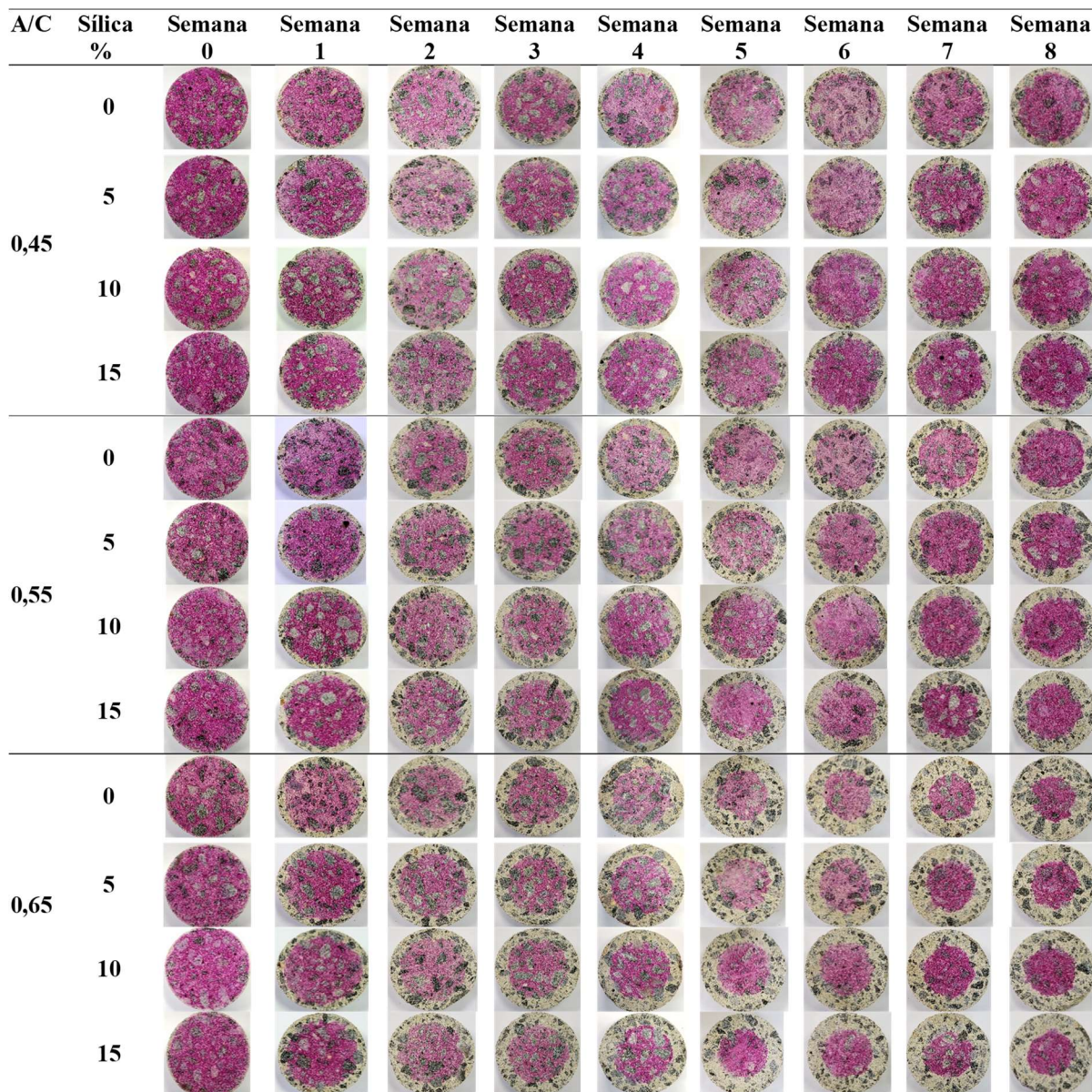


Figura 21. Concretos com aplicação de fenolftaleína (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Segundo Richardson (1988) *apud* Valdirene (2007, p. 23), o teor de CO₂ em um ambiente rural é cerca de 0,03% em volume, em ambientes marítimos 0,03%, em lugares fechados de 0,05% a 0,1%, em laboratório não ventilado 0,1%, em grandes cidades e regiões industrializadas é esperado de 0,3% a 1,0%, em garagens e viadutos 0,2% e em um silo de grão 1,0%.

Para efeito de análises comparativas, foi considerado teor de CO₂ de 0,3%, teor considerado para grandes cidades. Para tal avanço de frente de carbonatação representado neste experimento, careceriam de aproximadamente de 3 anos de exposição, ou seja, este ensaio foi acelerado em 17 vezes a esta condição ambiental.

Para todas estas amostras foram medidas individualmente 4 (quatro) posições diferentes e apresentado a média conforme tabelas 26 a 28, para o a/c 0,45, 0,55 e 0,65 respectivamente.

Amostra: Traço 1 - A/C 0,45 - (0% Silica)						Amostra: Traço 2 - A/C 0,45 - (5% Silica)					
Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média	Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média
Leitura inicial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Leitura inicial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1ª Semana	4,0	5,0	4,0	3,0	4,0	1ª Semana	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
2ª Semana	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	2ª Semana	3,0	4,0	5,0	4,0	4,0
3ª Semana	7,0	5,0	6,0	7,0	6,3	3ª Semana	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
4ª Semana	7,0	7,0	7,0	6,0	6,8	4ª Semana	6,0	7,0	6,0	7,0	6,5
5ª Semana	9,0	8,0	8,0	7,0	8,0	5ª Semana	8,0	6,0	7,0	7,0	7,0
6ª Semana	8,0	8,0	9,0	9,0	8,5	6ª Semana	7,0	8,0	8,0	8,0	7,8
7ª Semana	7,0	8,0	9,0	9,0	8,3	7ª Semana	7,0	9,0	9,0	8,0	8,3
8ªSemana	9,0	9,0	10,0	9,0	9,3	8ªSemana	7,0	9,0	11,0	9,0	9,0
Amostra: Traço 3 - A/C 0,45 - (10% Silica)						Amostra: Traço 4 - A/C 0,45 - (15% Silica)					
Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média	Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média
Leitura inicial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Leitura inicial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1ª Semana	7,0	5,0	4,0	5,0	5,3	1ª Semana	4,0	5,0	4,0	3,0	4,0
2ª Semana	6,0	5,0	6,0	6,0	5,8	2ª Semana	5,0	6,0	6,0	5,0	5,5
3ª Semana	6,0	7,0	8,0	7,0	7,0	3ª Semana	6,0	7,0	7,0	6,0	6,5
4ª Semana	7,0	8,0	8,0	7,0	7,5	4ª Semana	9,0	8,0	8,0	8,0	8,3
5ª Semana	8,0	9,0	9,0	9,0	8,8	5ª Semana	9,0	10,0	8,0	9,0	9,0
6ª Semana	8,0	8,0	9,0	10,0	8,8	6ª Semana	9,0	10,0	10,0	9,0	9,5
7ª Semana	8,0	9,0	9,0	9,0	8,8	7ª Semana	9,0	9,0	10,0	11,0	9,8
8ª Semana	11,0	9,0	10,0	10,0	10,0	8ª Semana	11,0	11,0	12,0	11,0	11,3

Tabela 26. Profundidade de Carbonatação nos concretos com A/C 0,45. (Autor,apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Amostra: Traço 5 - A/C 0,55 - (0% Silica)						Amostra: Traço 6 - A/C 0,55 - (5% Silica)					
Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média	Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média
Leitura inicial	1,0	1,0	2,0	1,0	1,3	Leitura inicial	2,0	2,0	1,0	1,0	1,5
1ª Semana	6,0	6,0	6,0	5,0	5,8	1ª Semana	7,0	7,0	7,0	6,0	6,8
2ª Semana	7,0	7,0	8,0	7,0	7,3	2ª Semana	7,0	9,0	9,0	8,0	8,3
3ª Semana	8,0	9,0	10,0	10,0	9,3	3ª Semana	11,0	10,0	11,0	10,0	10,5
4ª Semana	9,0	10,0	10,0	11,0	10,0	4ª Semana	10,0	12,0	10,0	12,0	11,0
5ª Semana	13,0	11,0	11,0	12,0	11,8	5ª Semana	13,0	12,0	13,0	13,0	12,8
6ª Semana	13,0	15,0	12,0	13,0	13,3	6ª Semana	13,0	15,0	16,0	13,0	14,3
7ª Semana	13,0	12,0	13,0	14,0	13,0	7ª Semana	12,0	14,0	16,0	14,0	14,0
8ª Semana	14,0	14,0	15,0	14,0	14,3	8ª Semana	14,0	16,0	16,0	15,0	15,3
Amostra: Traço 7 - A/C 0,55 - (10% Silica)						Amostra: Traço 8 - A/C 0,55 - (15% Silica)					
Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média	Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média
Leitura inicial	1,0	1,0	0,0	1,0	0,8	Leitura inicial	1,0	1,5	2,0	1,0	1,4
1ª Semana	6,0	6,0	5,0	6,0	5,8	1ª Semana	5,0	6,0	8,0	7,0	6,5
2ª Semana	7,0	7,0	8,0	8,0	7,5	2ª Semana	8,0	9,0	9,0	8,0	8,5
3ª Semana	8,0	10,0	9,0	10,0	9,3	3ª Semana	10,0	11,0	10,0	11,0	10,5
4ª Semana	9,0	10,0	10,0	11,0	10,0	4ª Semana	12,0	11,0	11,0	11,0	11,3
5ª Semana	13,0	11,0	13,0	11,0	12,0	5ª Semana	14,0	14,0	13,0	12,0	13,3
6ª Semana	13,0	13,0	13,0	12,0	12,8	6ª Semana	17,0	15,0	16,0	14,0	15,5
7ª Semana	14,0	15,0	14,0	13,0	14,0	7ª Semana	16,0	17,0	17,0	15,0	16,3
8ª Semana	13,0	15,0	13,0	15,0	14,0	8ª Semana	16,0	18,0	16,0	17,0	16,8

Tabela 27. Profundidade de Carbonatação nos concretos com A/C 0,55. (Autor, apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Amostra: Traço 9 - A/C 0,65 (0% Sílica)						Amostra: Traço 10 - A/C 0,65 - (5% Sílica)					
Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média	Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média
Leitura inicial	2,0	2,0	1,0	2,0	1,8	Leitura inicial	2,0	2,0	2,0	1,0	1,8
1ª Semana	7,0	7,0	8,0	7,0	7,3	1ª Semana	8,0	7,0	8,0	8,0	7,8
2ª Semana	11,0	11,0	11,0	10,0	10,8	2ª Semana	11,0	11,0	10,0	11,0	10,8
3ª Semana	14,0	14,0	13,0	14,0	13,8	3ª Semana	14,0	14,0	13,0	13,0	13,5
4ª Semana	15,0	15,0	17,0	15,0	15,5	4ª Semana	16,0	14,0	15,0	15,0	15,0
5ª Semana	21,0	19,0	20,0	21,0	20,3	5ª Semana	18,0	18,0	18,0	16,0	17,5
6ª Semana	20,0	23,0	20,0	23,0	21,5	6ª Semana	17,0	17,0	19,0	20,0	18,3
7ª Semana	21,0	22,0	22,0	22,0	21,8	7ª Semana	19,0	20,0	20,0	22,0	20,3
8ª Semana	23,0	25,0	23,0	24,0	23,8	8ª Semana	20,0	21,0	22,0	22,0	21,3
Amostra: Traço 11 - A/C 0,65 - (10% Sílica)						Amostra: Traço 12 - A/C 0,65 - (15% Sílica)					
Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média	Data	Profundidade de carbonatação (mm)				Média
Leitura inicial	2,0	2,0	2,0	1,0	1,8	Leitura inicial	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
1ª Semana	7,0	8,0	8,0	9,0	8,0	1ª Semana	10,0	10,0	9,0	9,0	9,5
2ª Semana	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	2ª Semana	11,0	11,0	12,0	12,0	11,5
3ª Semana	15,0	15,0	12,0	15,0	14,3	3ª Semana	16,0	15,0	15,0	15,0	15,3
4ª Semana	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	4ª Semana	16,0	16,0	15,0	18,0	16,3
5ª Semana	19,0	18,0	18,0	19,0	18,5	5ª Semana	19,0	20,0	21,0	20,0	20,0
6ª Semana	17,0	20,0	19,0	19,0	18,8	6ª Semana	20,0	21,0	20,0	21,0	20,5
7ª Semana	18,0	20,0	20,0	20,0	19,5	7ª Semana	19,0	20,0	22,0	22,0	20,8
8ª Semana	22,0	23,0	21,0	20,0	21,5	8ª Semana	22,0	24,0	22,0	25,0	23,3

Tabela 28. Profundidade de Carbonatação nos concretos com A/C 0,65. (Autor, apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Os concretos com $a/c \geq 0,55$ apresentaram uma pequena frente de carbonatação, observado pelo fato de imediatamente na camada superficial indicar um valor próximo de 2,0 mm. Como citado anteriormente nas referências teóricas dosagens com relações água /cimento maiores tendem a aumentar progressivamente as porosidades (índice de vazios), por sua vez maior facilidade de ingresso de substâncias no interior da estrutura do concreto, tais como água e outros agentes químicos.

Considerando cada um dos três grupos, de relações estudados individualmente com o seu referencial, observa se que a amplitude não ultrapassou 3 mm de frente de carbonatação comparados com a pior condição que seria com emprego de 15% de sílica. Com o intuito de quantificar os coeficientes de carbonatação dos concretos, segue abaixo

a tabela 29 com os valores coletados nesta pesquisa (concentração de CO₂ de 5%), bem como associação com o ambiente natural (concentração de CO₂ médio de 0,3%).

A/C	Silica %	Concentração CO ₂ em Câmara (%)	Tempo de Exposição em Câmara (semanas)	Profundidade Média de Carbonatação Acelerada (mm)	Coeficiente de Carbonatação Acelerada - 5% de CO ₂ (mm/semana ^{0,5})	Coeficiente de Carbonatação para Exposição Ambiente (0,3% de CO ₂)* (mm/semana ^{0,5})
0,45	0	5	8	9,3	3,3	0,193
	5	5	8	9,0	3,2	0,187
	10	5	8	10,0	3,5	0,208
	15	5	8	11,3	4,0	0,235
0,55	0	5	8	14,3	5,1	0,297
	5	5	8	15,3	5,4	0,318
	10	5	8	14,0	4,9	0,291
	15	5	8	16,8	5,9	0,349
0,65	0	5	8	23,8	8,4	0,495
	5	5	8	21,3	7,5	0,443
	10	5	8	21,5	7,6	0,447
	15	5	8	23,3	8,2	0,485

*Valor adotado com base em médias de ambientes urbano com fluxo intenso de veículos automotores.

Tabela 29. Coeficientes de Carbonatação de Concretos. (Autor, apoio laboratório terceiro, 2019, s.p)

Para facilitar a interpretação foi aplicada a primeira lei de Fick ou da lei da difusão, (Adolph Fick, fisiologista alemão), em sua forma simplificada e representativa, onde estabelece a correlação de profundidade carbonatada de um concreto em função da raiz quadrada do tempo de exposição ao CO₂ - ($k_c = E_c / \sqrt{t}$), neste caso expresso em mm/semana^{0,5}.

De acordo com os dados tabelados acima temos para o maior coeficiente de carbonatação registrado, aproximadamente 0,495 mm/semana^{0,5}- (a/c 0,65), bem como o menor, 0,187 mm/semana^{0,5}, representado no a/c 0,45. Lembrando que se faz em virtude de uma analogia simplória, onde considera-se que a câmara acelerou o processo ambiental em valores próximos de 17 vezes, além de desprezar algumas variáveis difíceis de controlar no ambiente natural tipo, oscilações de concentrações de CO₂, tempo de cura, períodos de chuvas, umidades e dentre outras sazonalidades.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de verificar a influência da adição da sílica ativa na velocidade da frente de carbonatação dos concretos, foram realizados estudos com diferentes relações água/cimento (a/c), sendo 0,45, 0,55 e 0,65, bem como variação do percentual de sílica nas proporções de 0, 5, 10 e 15 % em relação a massa de cimento. O processo de carbonatação acelerada dos concretos foi desenvolvido em uma câmara da marca Caron de propriedade da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABCP), com controle de temperatura de 23°C, umidade 65%, concentração de CO₂ de 5% e com pressão interna normal. Todas atividades desenvolvidas na unidade sobre coordenação do Eng. Flavio Munhoz.

Quanto ao objetivo geral do trabalho: Verificar a influência da sílica ativa na velocidade da frente de carbonatação do concreto, foi notada a influência da adição da sílica a partir da obtenção dos coeficientes de carbonatação máxima: a/c 0,45 – 4,0 mm/semana^{0,5}, a/c 0,55 – 5,9 mm/semana^{0,5} e a/c 8,4 – mm/semana^{0,5} no processo de aceleração através de câmara e correlacionando o resultado da câmara com uma possível exposição do concreto a um teor de CO₂ no ambiente de 0,3% obteve-se os seguintes coeficientes de carbonatação médio (K_{Cx}), sendo 0,20 mm/semana^{0,5}, 0,31 mm/semana^{0,5} e 0,46 mm/semana^{0,5}, para as relações água/cimento 0,45, 0,55 e 0,65 respectivamente.

Em consonância com outros estudos acadêmicos e evidenciados neste, quanto menor o a/c, maior foi a dificuldade de penetração do gás carbônico no concreto.

Para concretos com a/c 0,45, não houve reação com a fenolftaleína antecedente a exposição em câmara de CO₂ (medição inicial), porém para os a/c 0,55 e 0,65 foi quantificado uma média de 1,5mm e 2mm de carbonatação respectivamente. Tais condições podem estar associadas a algumas variáveis, tipo: consumo de cimento, tendência de maior número de porosidades para $a/c \geq 0,55$, ainda que com reações pozolânicas intensificadas pelo uso da sílica e formação de CSH, os interstícios na

microestrutura permitem penetração de agentes agressivos e umidade com maior facilidade.

Observou-se que de fato com o uso da sílica em substituição da massa cimentícia, existiu uma influência no âmbito de que a frente de carbonatação foi aumentando com o crescer do percentual de sílica atribuído. Conforme citados noutros estudos acadêmicos sobre o tema, há menções que existe influências da forma dimensional do corpo de prova, exemplo, cilíndricos e prismáticos. Fato especulado para incoerências observadas em regressão de valores de frente de carbonatação em relação ao referencial.

Quanto ao objetivo específico: Verificar a profundidade de carbonatação no concreto para diferentes teores de sílica ativa, foi utilizado a solução de fenolftaleína para visualizar e quantificar a frente de carbonatação nos concretos, porém teve-se algumas limitações quanto a medição de possíveis distúrbios no PH na faixa que compreende valores maiores que 9 na escala de potencial hidrogeniônico, visto estar fora da zona de corte da solução.

Os valores de penetração de CO₂ nos três grupos analisados (A/C 0,45, 055 e 0,65) individualmente ficaram com diferença próximo de 20% em relação ao seu referencial correspondente (concretos com 0% de adição de sílica). Na pior condição, desconsiderando médias e analisando maior valor de frente de carbonatação coletado, em números reais não ultrapassaram 3mm, que é um valor pequeno contrapondo com os cobrimentos citados pela NBR 6118, em relação as estruturas de concreto armado.

A máxima frente coletada dentre todos os concretos analisados é de 25 mm e média máxima de 23,8mm.

Quanto a hipótese inicial, a pesquisa corroborou com a ideia inicial de que o uso da sílica ativa na condição aplicada influenciou a frente de carbonatação do concreto, ainda que com amplitudes baixas, mas a cada percentual acrescido da sílica, maior a contribuição ao aumento da desta manifestação patológica.

Por motivos circunstanciais não foi possível o tratamento estatístico para ser expresso ainda nesta pesquisa, fato que limita algumas considerações na pesquisa.

Diante das observações no desenvolver deste estudo, algumas sugestões para trabalhos futuros:

- De carbonatação de concretos com adições pozolânicas e medição efetiva do comportamento de PH com método que visualize faixa de 9 a 13.
- De carbonatação com outros teores de CO₂ (1, 3, 6...%).
- De carbonatação com outras dimensões e formas de concreto (Ex. prismático, 5x10 cm).
- Fazer tratamento estatístico para as condições apresentadas no trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAKI, Eduardo Eiji. **Perícias, Laudos e Vistorias**. Disponível em <https://www.peritoengenheiro.com/single-post/2017/04/22/Como-ocorre-a-carbonata%C3%A7%C3%A3o-do-concreto>. Acesso em 25/08/18.

ALVES, José Dáfico. **Manual de tecnologia de concretos**. Local: *ABCP*, 2005, 218p.

ANDRADE, Maria Margarida de. **Introdução à metodologia do trabalho científico**, 5 ed. São Paulo : Atlas, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579 - MB 3432: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75µm (nº200)**. Rio de Janeiro, 1991, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12654: Controle de materiais componentes do concreto**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland: Preparo controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737: Cimentos Portland resistentes a sulfatos**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM26: Agregados-amostragem.** Rio de Janeiro, 2009, 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro, 2001, 11P.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001, 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM43: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2003, 13P.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009, 19p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2002, 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR11578: Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro, 1991, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7211: Agregado para concreto.** Rio de Janeiro, 2005, 11p.

BRANCO, Caio Pércles; PIERETTI, Renato Aparecido. **Avaliar a resistência do concreto curado à -5°C e 0°C, 40f. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia em Concreto Concreto - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.** Disponível em http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/773/1/CT_TCC_2012_1_09.PDF. Acesso em: 25 /08 2018.

BEUREN, Ilse Maria (Org.) **Como organizar Trabalhos Monográficos em Contabilidade: teoria e prática. 2.ed.** São Paulo: Editora Atlas, 2004,195p.

CARDOSO, Ana Carolina Nyznyk, MORISHITA, Cláudia. **Concreto. Arquitetura e Urbanismo- Conforto ambiental II. Universidade Federal do Paraná, 2003.** Disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAZjMAA/concreto?part=2>. Acesso 22/08/ 2016.

CARVALHO, João Dirceu Nogueira de. **Sobre as origens e desenvolvimento de concreto. Revista Tecnológica, n. 17, 2010, 18p.**

EDUARDO, Thomaz C.S. Notas de aula : **Efeitos da finura do cimento. Laboratório de Pesquisa de Materiais Estruturais - Instituto Lewis – Chicago, 1922, 10f.**

Disponível em http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/abrams_finura.pdf. Acesso 22/08/2016.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**, 4ed. São Paulo: Atlas S.A, 2002.

GUERRA, Ruy Serafim de Teixeira. **Clube do Concreto. Curva de Abrams**, 2013. Disponível em <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/05/abaixo-link-para-download-planilha-em.html>. Acesso em: 22 de maio, 2016.

GUERRA, Ruy Serafim de Teixeira. **Clube do Concreto. Determinação do teor de umidade no agregado graúdo por secagem**, 2013. Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/07/passopasso-determinacao-do-teor-de.html>. Acesso em: 25/08/18, as 13 horas.

GUERRA, Ruy Serafim de Teixeira. **Clube do Concreto. Determinação da massa específica, massa específica aparente, absorção do agregado graúdo**, 2003. Disponível em <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/07/passopasso-massa-especifica-massa.html>. Acesso em: 21/08/18.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de cimento Portland**. Local: IBRACOM, 2010.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Local: Pini, 1992.

HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo. **Dosagem de concretos de Cimentos Portland. Concreto: Ciência e tecnologia**. Local: IBRACOM, 2011. Disponível em <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>. Acesso em 19/08/18.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia, Vol. 1.** São Paulo: Ibracon 2011.

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

NEVILLE, A. M & BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto, 2ª ed.** Porto Alegre, Bookman, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MELO, Karoline Alves, *et al.* **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário.** 2005.

PEDROSO, Fábio Luis. **Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo. Por que o concreto é tão largamente empregado?** Revista IBRACON - Concreto, São Paulo, ano XXXVII, n.53, p.14, jan. / mar., 2009.

PITTA, Márcio Rocha; CARVALHO, Marcos Dutra de; RODRIGUES, Públio Penna Firme . **Materiais para Pavimentos de Concreto Simples.** ABCP, 1999,165p.

PORTAL DO CONCRETO. *Determinação dos tempos de pega do cimento*, 2016. Disponível em http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/cimento_4.html Acesso 24/08/18.

RIBEIRO, Carmen Couto; PINTO, Joana Darc da Silva; STARLING, Tadeu. **Materiais de construção civil.** Belo Horizonte: Escola de engenharia da UFMG .2ed.2006.

PASSOS, Ricardo. Carbonatação compromete a durabilidade das estruturas de concreto. Disponível em: <https://www.likd.com/pulse/carbonata%C3%A7%C3%A3o-compromete-durabilidade-das-estruturas-de-passos->> Acesso dezembro de 2018.

SILVA, Valdirene Maria. Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construída em escala natural e reduzida: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007. 306f. Tese de Doutorado, Engenharia das Estruturas. Disponível em:

http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2007DO_ValdireneMariaSilva.pdf.

Acesso em 28/08/18.

TÊNORIO, Jhonthas Judá Lima. **Avaliação de concretos produzidos com agregados reciclados de construção e demolição visando aplicação estrutural**: Universidade federal de Alagoas. 2007.157f. Dissertação (Mestrado)- Pontifícia Universidade Federal de Alagoas- Maceió. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Maceió. Disponível em:

[http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/Jonat has%20Juda%20Lima%20Tenorio.pdf](http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/Jonat%20Juda%20Lima%20Tenorio.pdf). Acesso em: 27/08/18.

VARELA, Marcio. **Apostila de materiais de construção, Curso técnico de edificações, Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Campos Natal Central. Laboratório de materiais para construção civil: Granulometria**, 2016, 34f. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/marciovarela/disciplinas/materiais-de-construcao/granulometria-1/granulometria> Acesso em: 22/08/18.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração. 5.ed.** São Paulo: Editora Atlas, 2004.

VLADIMIROVICH, Kirsanov Valeriy & TAKUDOME, Naguisa. **Carbonatação Compromete a Durabilidade das Estruturas de Concreto** <http://www.mapadaobra.com.br/inovacao/carbonatacao-compromete-a-durabilidade-das-estruturas-de-concreto/>. Acesso em 25/08/18.