



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

RENATA CRISTINA DE OLIVEIRA MORATO

**AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE QUANTO À CARBONATAÇÃO DE
CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO**

PAU DOS FERROS– RN

2017

RENATA CRISTINA DE OLIVEIRA MORATO

**AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE QUANTO À CARBONATAÇÃO DE
CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO**

Trabalho Final de Graduação apresentado ao Conselho do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial para obtenção do Título de Graduado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. José Daniel Jales
Silva

Coorientador: Prof. Me. Alisson Gadelha
de Medeiros

PAU DOS FERROS – RN

2017

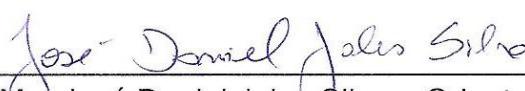
RENATA CRISTINA DE OLIVEIRA MORATO

**AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE QUANTO À CARBONATAÇÃO DE
CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO**

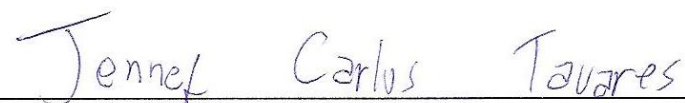
Trabalho Final de Graduação apresentado
ao Conselho do Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal Rural do
Semi-Árido, como requisito parcial para
obtenção do Título de Graduado em
Engenharia Civil.

APROVADA EM: 20/05/2017

BANCA EXAMINADORA


Prof. Me. José Daniel Jales Silva – Orientador (UFERSA)


Prof. Me. Alisson Gadelha de Medeiros – Coorientador (UFERSA)


Prof. Me. Jennef Carlos Tavares – Examinador interno (UFERSA)

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M831a Morato, Renata Cristina de Oliveira.
 AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE QUANTO À CARBONATAÇÃO
 DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO
 / Renata Cristina de Oliveira Morato. - 2017.
 70 f. : il.

Orientador: José Daniel Jales Silva.
 Coorientador: Alisson Gadelha de Medeiros.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
 2017.

1. adição mineral. 2. cerâmica vermelha. 3.
 concreto sustentável. 4. dióxido de carbono. I.
 Silva, José Daniel Jales , orient. II. Medeiros,
 Alisson Gadelha de, co-orient. III. Título.

RESUMO

O cenário atual tem motivado pesquisas para o reaproveitamento e reciclagem de resíduos como agregados no concreto e como materiais pozolânicos, a fim de proporcionar um novo descarte, reduzir custos, melhorar propriedades mecânicas, desempenho e durabilidade. Dentre estes resíduos destaca-se o Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV), proveniente de telhas, tijolos e blocos, que depois de triturado produz um pó com propriedades pozolânicas. Este estudo analisa e compara a durabilidade do concreto convencional e do concreto com resíduo cerâmico quanto a penetração de partículas de CO_2 em ambiente urbano. Confeccionou-se 44 Corpos de Prova (CP's), sendo 22 CP's de concreto convencional com 0% de substituição de cimento por RCV e 22 CP's de concreto com 25% de substituição de cimento por RCV, ambos com fator A/C de 0,65. Em seguida foram realizados os seguintes ensaios: slump test, absorção e porosidade, resistência à compressão e ensaio de durabilidade à carbonatação através da aspersão de fenolftaleína. Em todas as idades as amostras com adição de resíduo apresentaram maiores frentes e carbonatação, também apontaram um considerável aumento de porosidade e consequente perda de resistência à compressão, quando comparado ao traço referencial. Comprovando de modo insatisfatório a substituição de cimento por RCV, quanto as propriedades do concreto.

Palavras chaves: adição mineral, cerâmica vermelha, concreto sustentável, dióxido de carbono.

ABSTRACT

The current scenario has motivated the research for the reuse and recycling of waste as non-concrete aggregates and as pozzolanic materials, from a new disposal, reduce costs, improve mechanical properties, performance and durability. Among these residues, the Red Ceramic Residues (RCV), from tiles, bricks and blocks, which after crushing, produced with pozzolanic commodities, stand out. This study analyzes and compares the durability of conventional concrete and concrete with ceramic waste as a penetration of CO₂ particles in urban environment. A total of 44 proof bodies (PB's) were made, of which 22 PB's of conventional concrete 0% of cement substitution per RCV and 22 concrete PB's with 25% cement substitution for RCV, both with A/C factor of 0.65, Followed by the test trials: drop test, absorption and porosity, compressive strength and durability test for carbonation by phenolphthalein sprinkling. At all ages the samples with addition of residue presented larger fronts and carbonation, also indicated a considerable increase of porosity and consequent loss of compressive strength when compared to the reference trait. Unsatisfactorily proving the replacement of cement by RCV, as well as the properties of concrete.

Keywords: Mineral addition, red ceramics, sustainable concrete, carbon dioxide.

À Deus, à papai, mamãe e meu irmão por serem essenciais em minha vida e fontes de minha força e sabedoria.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e sempre à Deus que através de toda sua bondade me concedeu sabedoria, saúde e discernimento e graças alcançadas.

Aos meus pais, Carlos Eduardo Alves Morato e Suzana Aparecida de Oliveira Morato, e meu querido irmão Carlos Eduardo de Oliveira Morato que se fizeram presentes em todos os momentos, sempre transmitindo apoio, carinho e perseverança. E novamente a meu pai (*in memoriam*), meu maior exemplo de ser íntegro, meu grande incentivador e minha motivação para realização desse sonho. Meu alicerce de sabedoria, força e amor.

À toda minha família por todo o apoio e suporte durante todo o curso.

Ao meu orientador Prof. Me. José Daniel Jales Silva e Co-orientador Prof. Me. Alisson Gadelha de Medeiros por toda ajuda e dedicação prestada e categóricos conhecimentos compartilhados, deixo aqui minha sincera gratidão.

Aos grandes docentes do curso de Graduação em Engenharia Civil da UFERSA, por todo o conhecimento e apoio repassado, deixo aqui minha enorme gratidão.

Aos técnicos dos laboratórios, em especial a Valterson pela enorme ajuda proporcionada.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido, instituição que possibilitou minha formação.

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Norte por disponibilizar seu laboratório para realização desse estudo.

Aos meus grandes amigos, Bárbara Resende, Thalita Pimentel e Tiago Figueiredo que sempre estiveram presentes em todo meu crescimento de vida, por toda convivência, companheirismo e carinho.

Aos meus queridos amigos, Renato Victor, Esthefani Cavalcante, Bruna Ramos, Melissa Regina, Luiz Felipe, Uly Martins, Bárbara Beatriz, Mateus Carlos, Brenda Miranda, Ivan Jatai, Mateus Alves. Em especial Sariny Nobre e Ana Taís por toda ajuda, companheirismo e suporte, serei sempre grata.

Aos meus amigos da turma 2016.2 por todo companheirismo e auxílio.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentual de resistência atingida pelo CP 25	58
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção polida de um corpo-de-prova de concreto	19
Figura 2 – Zona de interface pasta/agregado.....	28
Figura 3 - Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armaduras	31
Figura 4 - Fluxograma de pesquisa.....	37
Figura 5 - Equipamento Los Angeles	40
Figura 6 - Corpos de prova moldados	44
Figura 7 - Equipamentos utilizados para o Slump Test	45
Figura 8 - Prensa Hidráulica.....	47
Figura 9 – Esquema de cortes dos CP's	48
Figura 10- Ensaio de Carbonatação.....	48
Figura 11 - Curva granulométrica do agregado miúdo	51
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	53
Figura 13 - Profundidades médias de carbonatação	60
Figura 14 - Linha de tendência das espessuras médias	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do clínquer e sua propriedade específica.....	21
Tabela 2 - Principais tipos de cimento.....	27
Tabela 3 - Mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado	30
Tabela 4 - Proporção e consumo dos materiais utilizados	41
Tabela 5 - Quantidade de CP's por traço	42
Tabela 6 - Volume total de concreto produzido	43
Tabela 7 - Quantidade de material utilizado na produção dos concretos	43
Tabela 9 - Dados do ensaio de massa específica e massa unitária.....	50
Tabela 10 - Composição granulométrica do agregado miúdo	51
Tabela 11 - Dados do ensaio de massa específica e massa unitária.....	52
Tabela 12 - Composição granulométrica do agregado graúdo.....	53
Tabela 13 - Dados do ensaio de massa específica e massa unitária.....	54
Tabela 14 - Dados do ensaio de superfície específica.....	55
Tabela 15 - Consistência do concreto	55
Tabela 16 - Massa específica do concreto	56
Tabela 17 - Porosidade dos concretos	56
Tabela 18 - Absorção dos concretos	57
Tabela 18 - Resistência à compressão dos concretos	57
Tabela 19 - Espessura de penetração do CO ₂ aos 28 dias.....	59
Tabela 20 - Espessura de penetração do CO ₂ aos 60 dias.....	59
Tabela 21 - Espessura de penetração do CO ₂ aos 90 dias	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivo geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	CONCRETO	17
2.1.1	Tipos de concreto.....	17
2.1.2	Macro e microestrutura do concreto	18
2.1.3	Constituintes do concreto	20
2.1.3.1	Aglomerantes	20
2.1.3.2	Agregados	22
2.1.3.3	Água.	23
2.1.4	Aditivos	24
2.1.5	Adições Minerais	25
2.1.5.1	Pozolanas.....	28
2.1.6	Durabilidade do concreto	29
2.1.6.1	Carbonatação	30
2.2	RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA.....	32
2.2.1	Definições gerais sobre resíduos sólidos.....	32
2.2.2	Definições gerais sobre cerâmica vermelha	33
2.2.2.1	Produção de resíduo de cerâmica vermelha	33
2.2.2.2	Produção de concreto e argamassa com adição de resíduo cerâmico	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	LOCAIS DA PESQUISA	38
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	38
3.2.1	Agregado miúdo	38
3.2.2	Agregado graúdo.....	39
3.2.3	Cimento	39
3.2.4	Resíduo cerâmico.....	40
3.2.5	Água.....	40
3.3	DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	41
3.3.1	Escolha do traço e dosagem	41

3.3.2	Cálculo dos quantitativos de materiais	42
3.3.3	Produção das amostras de concreto	43
3.4	ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	45
3.4.1	Ensaio de massa específica e abatimento do tronco de cone (slump test)	45
3.5	ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	46
3.5.1	Ensaio de Absorção e Porosidade	46
3.5.2	Ensaio de resistência à compressão	46
3.5.3	Ensaio de carbonatação	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	50
4.1.1	Massa específica real e massa unitária	50
4.1.2	Análise granulométrica	50
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	52
4.2.1	Massa específica real e massa unitária	52
4.2.2	Análise Granulométrica	52
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO	54
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO	54
4.5	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	55
4.5.1	Ensaio de consistência e massa específica	55
4.5.2	Ensaio de absorção e porosidade	56
4.5.3	Ensaio de resistência à compressão	57
4.5.4	Ensaio de carbonatação	59
5	CONCLUSÕES	63
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A revolução industrial foi o principal marco para o crescimento das cidades e para uma acelerada expansão urbana. O desenvolvimento da construção civil acompanhou o avanço urbano e desse modo, tornou-se alarmante em consequência ao alto consumo de recursos naturais e elevada geração de resíduos sólidos, tornando este setor bastante nocivo ao meio ambiente. Pontos importantes como áreas de descarte, limpeza urbana, gerenciamento dos resíduos produzidos e reciclagem dos resíduos gerados, ainda são esquecidos e pouco executados.

Apesar disso, a construção civil hoje é responsável por grande parte do PIB geral do Brasil, assumindo um valor de 10,1%, desse modo, desenvolve um importantíssimo papel à economia brasileira ocupando 13,5% de toda força de trabalho do país. Apenas nos três primeiros meses de 2015 a construção civil movimentou, cerca de R\$ 253,6 bilhões (FIESP, 2015). Devido ao grande avanço, esse setor consome grande parte dos recursos naturais extraídos no planeta. De acordo com Valverde (2001), os agregados para a indústria da construção civil são os insumos minerais mais consumidos no mundo além disso, “o concreto é o segundo material mais consumido pelos homens, depois da água” (ALMEIDA e LUZ, 2009).

A principal adversidade, do ponto de vista ambiental está relacionada com os resíduos sólidos oriundos da construção e demolição, resíduos das construções civis e os resíduos das indústrias civis, em virtude da deposição irregular que na maioria dos municípios brasileiros são depositados em “lixões” clandestinos, margens de rios e terrenos baldios (JOHN e AGOPYAN, 2013). Dentro desse contexto encontram-se as indústrias de cerâmica vermelha na qual o seu processo de fabricação gera uma quantidade significativa de resíduo, que quando descartados de modo inadequado, afetam o ambiente natural, social e urbano.

À vista disso, surge o conceito de “concreto sustentável” que tenta aproximar a construção civil ao conceito de desenvolvimento sustentável, este compreendido como um processo que estima o desenvolvimento tecnológico visando atender as necessidades futuras, abrangendo mudanças culturais, na educação, ambientais e uma visão sistêmica (BRANDON, 1998 *et al. apud* SILVA, 2003). Os concretos sustentáveis têm como objetivo poupar recursos naturais, de modo que os produtos substituintes conservem ou melhorem as propriedades do concreto convencional, como também evitar o descarte de substâncias nocivas ao meio ambiente.

Portanto, o cenário atual tem motivado pesquisas, semelhantes ao presente trabalho, que aliem o aproveitamento e reciclagem desses resíduos como agregados ou aglomerantes no concreto, a fim de proporcionar um novo descarte, reduzir custos, melhorar propriedades mecânicas, desempenho e durabilidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

Um dos maiores obstáculos para o setor da construção civil, além do gerenciamento dos resíduos sólidos, é aumentar a vida útil das estruturas, combatendo o surgimento das manifestações patológicas, que é um dos processos mais correntes de deterioração do concreto armado atualmente.

Apesar do atual avanço tecnológico os custos decorrentes das falhas provocadas pela corrosão ainda são bastante onerosos, pois além de ser apontada como “umas das manifestações patológicas de maior incidência” (HELENE, 1986), ela também ocasiona problemas associados com a deterioração ou destruição de material, tornando-se um fator de grande importância a ser considerado em projetos de construção civil.

A corrosão pode ser provocada por dois processos principais sendo eles, ataque por íons cloreto (CL^-) e a carbonatação (CO_2), estes agentes penetram no concreto através dos poros, fissuras ou trincas e destroem a película passivadora da armadura provocando a corrosão. Em vista disto, medidas preventivas são adotadas visando aumentar a vida útil das estruturas, dificultando o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto. Entre elas pode-se destacar, o cobrimento das armaduras, o controle da fissuração, e a adoção de um concreto de baixa porosidade. Porém, o emprego dessas medidas exige custos adicionais encarecendo o concreto.

Neste sentido, é louvável a realização de novos estudos que aliem o reaproveitamento de resíduos sólidos, como o RCV (resíduo de cerâmica vermelha), com o propósito de abordar suas implicações na resistência à corrosão por carbonatação do concreto, pois além das vantagens econômicas e ecológicas, o reaproveitamento garante benefício técnico: “podendo substituir até 25% dos materiais convencionais por reciclados sem alterar as propriedades mecânicas” (COSTA, 2006).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar e comparar a durabilidade do concreto convencional e concreto com resíduo cerâmico quanto a penetração de partículas de CO₂ em ambiente urbano.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar uma caracterização física do resíduo cerâmico utilizado;
- Avaliar propriedades físicas e mecânicas dos concretos produzidos no estado fresco e endurecido;
- Estudar a influência do resíduo cerâmico na resistência à penetração de CO₂ em concretos de cimento Portland;
- Avaliar o potencial de carbonatação dos traços escolhidos em três diferentes regiões da cidade de Pau dos Ferros, RN.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO

O concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem, principalmente em conjunto com o aço, formando o concreto armado. Este material é amplamente conhecido e bem utilizado, por projetistas, construtores e operários pois é a opção mais versátil e economicamente viável para construções dos mais variados tipos (TUTIKIAN; ISAIA e HELENE, 2011).

Isaia (2011) também destaca algumas das principais propriedades que o tornam o material mais empregado na Construção Civil, tais como: disponibilidade; versatilidade; hiperestabilidade; facilidade de execução; durabilidade; custo e sustentabilidade.

Segundo Neville e Brooks (2013), concreto é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante, ou seja, é o produto da reação entre um cimento hidráulico e água. Convencionalmente é tido como uma mistura de cimento Portland, água e agregados (miúdos e graúdos). Além disso, segundo Mehta e Monteiro (1994) em algumas situações podem ser incorporados à mistura alguns aditivos e/ou adições, que podem modificar, por exemplo, seu tempo de pega e a sua trabalhabilidade sem necessariamente modificar a sua resistência mecânica prevista.

No entanto, o concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, agregados de concreto reciclado, polímeros, fibras, entre outros (NEVILLE e BROOKS, 2013). A proporção entre os diversos constituintes do concreto é determinada de acordo com as propriedades a serem atendidas simultaneamente, como às propriedades mecânicas, físicas, de durabilidade e a trabalhabilidade necessária para o transporte, lançamento e adensamento do concreto (HELENE e ANDRADE, 2010).

2.1.1 Tipos de concreto

De acordo com a NBR 8953/2015, os concretos podem ser classificados segundo a sua massa específica em:

- Concreto leve: concreto com massa específica seca, de acordo com a NBR 9778/2009, inferior a 2000 kg/m³;
- Concreto de peso normal: concreto com massa específica seca, de acordo com a NBR 9778/2009, compreendida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³;
- Concreto pesado: concreto com massa específica seca, de acordo com a NBR 9778/2009, superior a 2800 kg/m³.

Segundo Lima (2015), os concretos podem também ser classificados em relação à sua resistência à compressão aos 28 dias, conforme a NBR 8953/2015:

- Concreto de baixa resistência: menos de 20 MPa (não adequado à finalidade estrutural, segundo a NBR 6118/2014);
- Concreto de resistência normal: 20 a 50 MPa;
- Concreto de alta resistência: mais de 50 MPa.

Ainda de acordo com NBR 8953/2015 os concretos são classificados por sua consistência no estado fresco, determinada a partir do ensaio de abatimento pela NBR NM 67/1998 como:

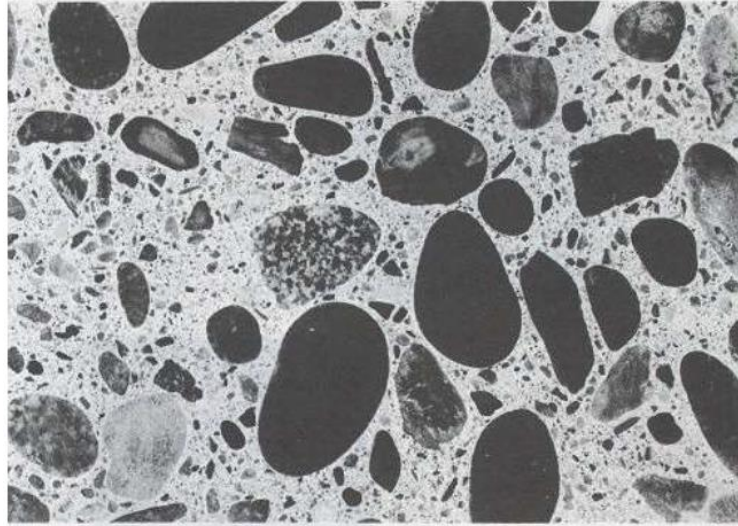
- S10: Possui um abatimento de $10 \leq A < 50$ mm, é utilizado como concreto extrudado, vibroprensado ou centrifugado;
- S50: Possui um abatimento de $50 \leq A < 100$ mm, utilizado em alguns tipos de pavimentos e fundações;
- S100: Possui um abatimento de $100 \leq A < 160$ mm, utilizado em elementos estruturais com lançamento convencional;
- S160: Possui um abatimento de $160 \leq A < 220$ mm, utilizado em elementos estruturais com lançamento bombeado;
- S220: Possui um abatimento ≥ 220 mm, utilizado em elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armadura.

2.1.2 Macro e microestrutura do concreto

O concreto de cimento Portland é um material poroso, com uma estrutura bastante heterogênea e complexa. Analisando sua macroestrutura é capaz de identificar duas fases que podem ser facilmente distinguidas entre si, sendo elas: o meio ligante composto de uma pasta de cimento endurecida e as partículas de agregado com formas e tamanhos variados. Desse modo, o concreto em sua

macroestrutura pode ser considerado como um material bifásico (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Seção polida de um corpo-de-prova de concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

Em análise a uma micrografia do concreto fica evidente a complexidade das duas fases, não sendo diferenciadas de forma bem distinta como na macroestrutura. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), em nível microscópico a pasta de cimento hidratado não é uma estrutura homogênea, algumas regiões da pasta de cimento aparentam serem tão densas quanto o agregado, enquanto que outras são altamente porosas. Além das duas fases abordadas anteriormente, é possível destacar uma terceira fase que fica localizada na interface dos agregados com a pasta, sendo chamada de zona de transição. Esta zona é geralmente mais fraca do que os outros dois componentes principais do concreto, e, conseqüentemente, exerce uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico do concreto do que pode ser esperado pela sua espessura.

Além disso, observando-se concretos endurecidos fabricados com diferentes idades e relação água/cimento percebe-se, em geral, que o volume de vazios capilares na pasta de cimento hidratada diminui com a redução da relação água/cimento ou com o aumento da idade de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.1.3 Constituintes do concreto

O concreto, como exposto anteriormente, é composto por uma mistura de aglomerante, água e agregados. Estes componentes devem ser minuciosamente estudados pois são elementos capazes de influenciar no desempenho do concreto devido as suas propriedades físicas e químicas.

2.1.3.1 Aglomerantes

Definem-se como produtos empregados na construção civil para fixar ou aglomerar outros materiais entre si. Normalmente são materiais em forma de pó, quando misturados com a água, formam uma pasta capaz de endurecer por simples secagem ou devido à ocorrência de reações químicas (HAGEMANN, 2011). Na construção civil existem diversos tipos de aglomerantes empregados nas mais variadas atividades, destacando-se o cimento Portland, asfalto, cal e gesso. No caso do concreto estudado no presente trabalho o aglomerante utilizado é o cimento Portland.

Este pode ser caracterizado como um material pulverulento e de cor acinzentada, possui propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes que na presença de água entra em estado de hidratação formando uma pasta e em seguida tornando-se rígida (CZERNIN, s/d *apud* LIMA 2015).

O principal constituinte do cimento Portland é o clínquer Portland um material resultante da calcinação a aproximadamente 1450°C e posterior moagem, de uma mistura de cálcio e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, empregados de forma a garantir o equilíbrio químico, proporcionando a formação de compostos hidráulicos que garante as propriedades ligantes ao cimento Portland (BATTAGIN, 2011). Desta forma, toda a composição química do cimento Portland proporciona as reações com a água exatas para dar origem ao processo de endurecimento, à vista disso é possível afirmar que este composto é um aglomerante hidráulico resultante da moagem do clínquer.

Para uma melhor compreensão das reações químicas que acontecem no processo de endurecimento e nas propriedades finais do concreto, é importante que se conheça a composição básica do clínquer logo, os constituintes fundamentais na composição química do cimento portland são principalmente: a cal (CaO), a sílica

(SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto (BATTAGIN, 2011). A Tabela 1 a seguir mostra os principais compostos do cimento.

Tabela 1 - Principais compostos do clínquer e sua propriedade específica

Composto	Fórmula Química	Abreviação	% no Clínquer	Propriedades Tecnológicas
Silicato Tricálcico (Alita)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	50 – 65	Endurecimento rápido, alto calor de hidratação, alta resistência inicial.
Silicato Bicálcico (Belita)	2CaO.SiO	C ₂ S	15 – 25	Endurecimento lento, baixo calor de hidratação, baixa resistência inicial.
Aluminato Tricálcico (Aluminato)	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	6 – 10	Pega rápida, controlada pela adição de gesso, suscetível a ataque de meios sulfatados, alto calor de hidratação, alta retração, baixa resistência final.
Ferro Aluminato Tetracálcico (Ferrita)	4CaO.Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AFe	6 – 10	Endurecimento lento, resistente a meios sulfatados, não contribui para resistência, coloração escura.
Cal Livre	CaO	C	0,5 – 1,50	Aceitável somente em pequenas quantidades, pois causam aumento de volume e fissura.

Fonte: Neville e Brooks (2013).

A hidratação do cimento Portland acontece quando o cimento em contato com a água, os silicatos e aluminatos do cimento Portland se hidratam, e com o decorrer do tempo produzem uma massa sólida e resistente (NEVILLE e BROOKS 2013). A hidratação evolui com o tempo, tendo aos 28 dias de cura cerca de 70-80% de grau de hidratação e praticamente se completando aos 365 dias. O processo de hidratação depende do tipo e da finura do cimento, da relação entre água e cimento, da temperatura de cura e da presença de aditivos químicos e minerais. (GONÇALVES; FILHO e FAIRBAIRN, 2006).

Os principais compostos cimentícios do cimento são os dois silicatos de cálcio (C₃S e C₂S), o produto da hidratação do C₃S é o composto hidratado microcristalino C₃S₂H₃ com a liberação de cal Ca(OH)₂. O C₂S possui uma reação de hidratação

semelhante porém com uma menor liberação de cal. De maneira geral, os silicatos de cálcio após a hidratação são chamados de C-S-H. Já a hidratação do C_3A se dá de forma muito rápida, transformando sua estrutura em uma forma cristalina cúbica circundada pelos silicatos de cálcio hidratados, com o objetivo de desacelerar a sua pega é adicionado sulfato de cálcio ao clínquer (NEVILLE e BROOKS, 2013).

O principal responsável pela resistência em todas as idades do concreto é o silicato tricálcico (C_3S), especialmente no primeiro dia, até o fim do primeiro mês de cura. Já o silicato bicálcico (C_2S) se torna extremamente importante no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo responsável pelo ganho de resistência no período de um ano ou mais. No início do período de cura, o aluminato de cálcio (C_3A) é o principal contribuinte para o calor de hidratação e quando presente em forma cristalina é também o maior responsável pela rapidez de pega, sendo o silicato tricálcico (C_3S) o segundo componente mais importante para estes processos (BAUER, 2000).

2.1.3.2 Agregados

De acordo com a NBR 7211/2009, os agregados são grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, que não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que afetem a hidratação e o endurecimento do cimento, a durabilidade, a proteção da armadura contra a corrosão, ou, que afete o aspecto visual externo do concreto. Igualmente, Bauer (2000) afirma que agregado é um material fragmentado, incoesivo, inerte, constituído de misturas de partículas de vários tamanhos granulométricos. No ramo da construção pode ser conhecido conforme cada caso, pelo nome específico: fíler, pedra britada, bica-corrida, entre outros.

No entanto, Neville e Brooks (2013) afirmam que os agregados na realidade não são totalmente inertes, já que suas propriedades físicas, térmicas e algumas vezes químicas influenciam no desempenho do concreto melhorando sua estabilidade dimensional e durabilidade em relação às da pasta de cimento. Ainda afirmam que aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume de concreto são ocupados por agregados, portanto, do ponto de vista econômico é vantajoso produzir concretos com maior teor de agregados e a menor quantidade de cimento possível, mas a relação custo/benefício deve ser contrabalanceada com as propriedades desejadas do concreto no estado fresco e endurecido.

Os agregados são materiais de grande importância para a durabilidade, resistência e desempenho estrutural do concreto, portanto sua qualidade é um fator determinante para condicionar o bom comportamento do concreto, na fase fresca, endurecida e em toda sua vida útil. Segundo Almeida (2009), por isso os agregados devem ser isentos de qualquer tipo de açúcar, porque impede a pega do cimento e isento de impurezas como terra, argila e húmus. Além de apresentar uma baixa concentração de componentes prejudiciais como cloretos, no máximo 0,02%, e sulfatos, no máximo 1%.

Estes materiais podem ser classificados quanto a origem (naturais, industrializados, miúdo e graúdo), quanto as dimensões das partículas (miúdo e graúdo) e quanto ao peso específico aparente (leves, médios e pesados).

Segundo Bauer (2000), os naturais são os agregados que já se encontram em forma particulada na natureza como areia e cascalho, os industrializados são os que têm sua composição particulada obtida por processos industriais como rocha, escória de alto forno e argila.

Quanto às dimensões do agregado, de acordo com a NBR 7211/2009, agregados miúdos são os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e agregado graúdo são cujos grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Os

Quanto a massa específica aparente, que é compreendida como uma relação entre a massa agregado seco e seu volume incluindo os vazios entre os grãos, Silva (2012) os classifica em:

- agregados leves – $g < 1000\text{Kg/m}^3$;
- agregados normais – $1000\text{Kg/m}^3 < g < 2000\text{Kg/m}^3$;
- agregados densos – $g > 2000\text{Kg/m}^3$.

2.1.3.3 Água

A procedência da água usada para produção do concreto é um fator determinante para a qualidade final do concreto pois, a alta concentração de sódio, potássio, entre outras substâncias, pode afetar negativamente a resistência do concreto, corroer as armaduras e provocar manchas na superfície do mesmo, sendo

a água potável a mais recomendada no uso do concreto tanto no amassamento como também na cura do mesmo (NEVILLE e BROOKS, 2013).

2.1.4 Aditivos

Bauer (2000), caracteriza os aditivos como um produto importante à composição e propriedade do concreto, que pode ser colocado na betoneira imediatamente antes ou durante a mistura do concreto, em quantidades geralmente pequenas e bem homogeneizado.

Estas substâncias são capazes de conferir ou modificar certas propriedades do estado fresco ou endurecido, conferindo vantagens físicas e econômicas ao concreto. Estes benefícios incluem a utilização do concreto em situações em que antes existiam dificuldades consideráveis ou mesmo insuperáveis. Podem ser definidos como produtos químicos que, exceto em casos especiais, é adicionado ao concreto em quantidades máximas de 5%, em relação à massa de cimento, podendo ser utilizados no estado sólido ou líquido (NEVILLE, 2015).

A ABNT através da NBR 11768/2011, estabelece a classificação a seguir para os aditivos:

- Plastificante (tipo P): Aumenta o índice de consistência do concreto, mantendo a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir um concreto com determinada resistência;
- Retardador (tipo R): Aumenta os tempos de início e fim de pega do concreto;
- Acelerador (tipo A): Diminui os tempos de início e fim de pega do concreto e acelera o desenvolvimento das suas resistências iniciais;
- Plastificante retardador (tipo PR): Combina os efeitos dos aditivos plastificantes e retardadores;
- Plastificante acelerador (tipo PA): Combina os efeitos dos aditivos plastificantes e aceleradores;
- Incorporador de ar (tipo IAR): Incorpora pequenas bolhas de ar ao concreto;
- Superplastificante (tipo SP): Aumenta o índice de consistência do concreto, mantendo a quantidade de água de amassamento, ou possibilita a redução de,

no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento para produzir um concreto com determinada consistência;

- Superplastificante retardador (tipo SPR): Combina os efeitos dos aditivos superplastificante e retardador;
- Superplastificante acelerador (tipo SPA): Combina os efeitos dos aditivos superplastificante e acelerador.

2.1.5 Adições Minerais

De acordo com a NBR 11172/1990 adições são produtos de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos com a finalidade de alterar certas propriedades. Moraes (2012), afirma que devido os aditivos minerais terem às suas propriedades semelhantes aos do cimento, estes têm o objetivo de somar ou substituir o cimento, enquanto que os aditivos químicos alteram as características do cimento, sem alterar sua proporção.

As adições minerais, são classificadas de acordo com a possibilidade de haver ação aglomerante potencial ou não, sendo denominadas como predominantemente reativas (APR) e predominantemente inertes (API). Assim, as APR, interagem química e fisicamente com os produtos da hidratação do cimento Portland, modificando a microestrutura da pasta, que são por exemplo materiais pozolânicos e cimentícios (CAVALCANTI, 2006).

Já as API são incorporadas ao concreto em substituição ao agregado miúdo, por serem partículas mais finas têm a ação física de promover maior compacidade e refinamento de poros do concreto, aumentando a densidade e preenchendo vazios. (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Alguns exemplos de adições minerais são citadas por Mehta e Moteiro (2008) de acordo com suas propriedades:

- Cimentantes: Escória granulada de alto forno;
- Superpozolanas: Sílica ativa, metacaulim e cinzas de casca de arroz;
- Pozolanas comuns: Cinzas volantes com baixo teor de cálcio, argilas calcinadas e materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar);

- Pozolanas pouco reativas: Escória de alto forno resfriada lentamente, cinzas de forno, escória de caldeira e palha de arroz queimada em campo;
- Adições Inertes (filler) : Cálcario, pó de calcário e pó de pedra.

Várias são as maneiras de produção de um cimento composto. Uma maneira é pela moagem conjunta do clínquer Portland com os demais cimentos. Uma segunda maneira é pela mistura de dois ou, mais materiais já em sua forma final. Ou até mesmo de forma alternativa, o cimento Portland e uma ou mais adições podem ser, separadamente, ou ao mesmo tempo colocadas na betoneira (NEVILLE, 2015).

As adições são matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Principais tipos de cimento

Classificação tradicional		Classificação europeia (BS 8500-1: 2006)	
Britânica	Americana		
Portland comum (BS 12)	Tipo I (ASTM C 150)	Tipo (CEM) I	Portland
Portland de alta resistência inicial (BS 12)	Tipo III (ASTM C 150)	Tipo IIA	Portland com 6 a 20% de cinza volante, cal, calcário ou 6 a 10 % de sílica ativa
Portland de baixo calor de hidratação (BS 1370)	Tipo IV (ASTM C 150)		
Cimento modificado	Tipo II (ASTM C 150)	Tipo IIB-S	Portland com 21 a 35% de cal
Portland resistente a sulfatos (SRPC) (BS 4027)	Tipo V (ASTM C 150)		
Portland de alto-forno (cimento de escória) (BS 146)	Tipo IS Tipo S Tipo I (SM) (ASTM C 595)	Tipo IIB-V	Portland com 21 a 35% de cinza volante
Alto teor de escória de alto-forno (BS 4246)	--	Tipo IIB+SR	Portland com 25 a 35% de cinza volante com moderada resistência a sulfatos
Portland branco (BS 12)	--	Tipo IIIA	Portland com 36 a 65% de cal
Portland pozolânico (BS 6588; BS 3892)	Tipo IP Tipo P Tipo I (PM) (ASTM C 595)	Tipo IIIA+SR	Portland com 36 a 65% de cal com moderada resistência a sulfatos
		Tipo IIIB	Portland com 66 a 80% de cal
		Tipo IIIB+SR	Portland com 66 a 80% de cal com moderada resistência a sulfatos
		Tipo IIIC	Portland com 81 a 95% de cal
		Tipo IVB-V	Portland com 36 a 55% de cinza volante

Nos cimentos americanos a adição de incorporador de ar é designada pela letra A. Os cimentos de moderada resistência a sulfatos ou moderado calor de hidratação são identificados pela ASTM C 525, pela adição das siglas MS ou MH. EaF é escória granulada de alto-forno.

Fonte: Neville e Brooks (2013).

2.1.5.1 Pozolanas

As pozolanas são substâncias constituídas de sílica e alumina que, em presença de água, combina-se com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes. São classificadas em naturais, artificiais e subprodutos industriais (COUTINHO, 1997; NEVILLE, 1995; MEHTA e MONTEIRO, 1994 *apud* JUNIOR, 2011).

Os materiais pozolânicos são utilizados no concreto com o objetivo de melhorar a sua trabalhabilidade, reduzir a liberação de calor diminuindo, portanto, o risco de fissuração, além de melhorar o custo benefício do concreto (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

As partículas finamente moídas possibilitam uma maior coesão facilitando o efeito *filler*. Este efeito pode ser definido pelo preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento e agregados, aumentando assim a compacidade do material e a sua resistência, como mostra na Figura 2. É justamente esta característica que se busca nos estudos de adição de material cerâmico moído (WADA, 2010).

Figura 2 – Zona de interface pasta/agregado



Fonte: Simpósio Internacional de estruturas, Geotecnia e Materiais de Construção, 2008.

2.1.6 Durabilidade do concreto

As estruturas de concreto armado com o decorrer do tempo foram sendo submetidas a novos tipos de solicitações, novas necessidades competitivas e novas exigências de sustentabilidade no setor da Construção Civil, surgindo em conjunto com uma tendência mundial no sentido de privilegiar os aspectos de projeto voltados à durabilidade e à extensão da vida útil das estruturas de concreto armado (CLIFTON, 1993).

De acordo com Neville (2013), o concreto deve ser capaz de suportar as intempéries e condições de exposição para o qual foi projetado. Portanto, entende-se por durabilidade como a capacidade que uma peça de concreto continue a desempenhar suas funções previstas durante sua vida, ou seja, mantenha sua resistência necessária e sua condição de utilização durante um tempo especificado ou uma vida útil esperada.

Portanto, durabilidade não é uma característica isolada do material, é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente, e as condições de uso e manutenção. Uma estrutura em suas diversas partes tem diferentes comportamentos e funções referente à durabilidade. Por exemplo, em uma estrutura de concreto armado e protendido, o aço é a parte mais sensível ao ataque do meio ambiente e por essa razão as armaduras devem ficar protegidas através de uma espessura de concreto de cobrimento (ANDRADE, HELENE e MEDEIROS, 2011).

Este cobrimento de concreto sobre o aço também possui variações de durabilidade com o decorrer do tempo. Logo após seu lançamento e cura os processos de degradação e envelhecimento começam a agir sobre a estrutura, alterando suas propriedades originais e ideais para a sua vida útil que poderá culminar com a despassivação das armaduras (ANDRADE, HELENE e MEDEIROS, 2011).

Devido à estrutura do concreto ser porosa os principais fenômenos de deterioração físico-química estão associados à ação da água e gases em movimento, a amplitude desse ataque é proporcional à permeabilidade do concreto. Nos ataques por fenômenos químicos a água é o agente de transporte dos íons agressivos.

Entre os principais agentes agressivos às estruturas de concreto armado alguns são agressivos apenas à armadura, como o gás carbônico (CO_2) e o cloreto (Cl^-) e outros são agressivos apenas ao concreto como os ácidos, sulfatos e a reação álcali-agregado, estes últimos atuam de forma dupla, atacando primeiramente o

concreto e por último a armadura, devido a fissuração e deslocamento do cobrimento de proteção (HELENE, 2001). A Tabela 3 apresenta alguns mecanismos de deterioração do concreto e da armadura de acordo com a natureza do processo.

Tabela 3 - Mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado

agressividade do ambiente		consequências sobre a estrutura	
natureza do processo	condições particulares	alterações iniciais na superfície do concreto	efeitos a longo prazo
carbonatação	umidade relativa (UR) de 60% a 80%	imperceptível	redução do pH corrosão de armaduras fissuração superficial
lixiviação	atmosfera ácida, águas puras	eflorescências, manchas brancas	redução do pH corrosão de armaduras desagregação superficial
retração	umedecimento e secagem, ausência de cura UR baixa (< 50%)	fissuras	fissuração corrosão de armaduras
fuligem	partículas em suspensão na atmosfera urbana e industrial	manchas escuras	redução do pH corrosão de armaduras
fungos e mofo	temperaturas altas (>20°C e <50°C) com UR > 75%	manchas escuras e esverdeadas	redução do pH desagregação superficial corrosão de armaduras
concentração salina, Cl ⁻	atmosfera marinha e industrial	imperceptível	despassivação e corrosão de armaduras
sulfatos	esgoto e águas servidas	fissuras	expansão → fissuras desagregação do concreto corrosão de armaduras
álcali-agregado	composição do concreto umidade, UR > 95%	fissuras gel ao redor do agregado gráúdo	expansão → fissuras desagregação do concreto corrosão de armaduras

Fonte: Adaptado de Andrade, Helene e Medeiros (2011).

Os principais fatores que interferem na vida útil e na rápida deterioração do concreto é a utilização de materiais de baixa qualidade, erros de projeto e execução, entre outros.

2.1.6.1 Carbonatação

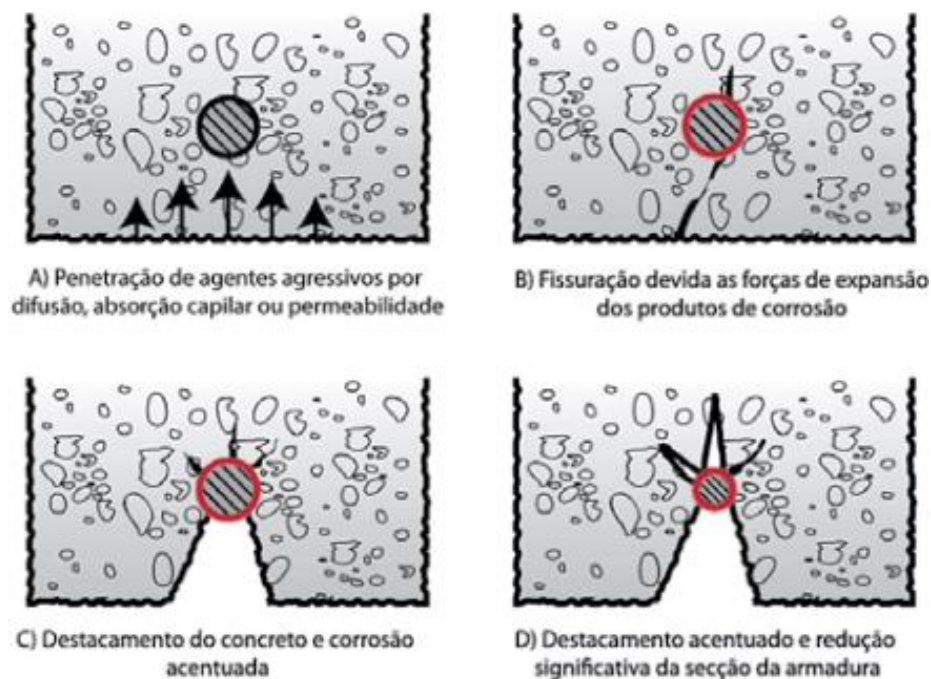
Dentre os constituintes da pasta de cimento, os álcalis, dentre eles o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, confere ao concreto uma alta alcalinidade: o pH da mistura está entre 12 e 13. Esses valores promovem a formação de um filme de óxido nas barras de aço que as protege da corrosão (película passivadora) (HELENE, 1986).

A reação de carbonatação é mais intensa, quanto maior for a concentração de CO_2 na atmosfera e quanto maior o índice de vazios do concreto. Assim, o CO_2 presente na atmosfera, penetra no concreto através dos seus poros por processo de difusão, provocando a redução do pH da pasta de cimento, produzindo um meio ácido

que conseqüentemente ocasiona a alteração ou eliminação da película passivadora do aço, resultando na sua corrosão.

Apesar da carbonatação não ser responsável diretamente por patologias, o grande volume dos óxidos gerados a partir da corrosão do aço, causa fissuração ou deslocamento do cobrimento, podendo acarretar até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de suas partes. A Figura 3 exemplifica o processo de corrosão de armadura por carbonatação.

Figura 3 - Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armaduras



Fonte: Helene (1986).

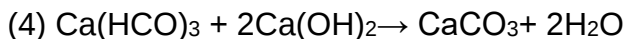
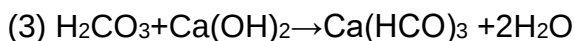
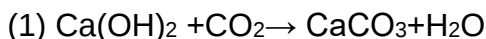
De acordo com Silva (1998), todo o processo de carbonatação do concreto pode ser explicado conforme as etapas de reações químicas a seguir:

Equação 1: É a equação geral da carbonatação (período de iniciação).

Equação 2: O gás carbônico atmosférico é dissolvido na água intersticial do concreto formando o ácido carbônico.

Equação 3: O ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio originando bicarbonato de cálcio e água.

Equação 4: O bicarbonato de cálcio e o hidróxido de cálcio dão origem, em uma reação de dupla troca, a carbonato de cálcio e água.



O fenômeno de carbonatação não é perceptível a olho nu, não reduz a resistência do concreto e até aumenta a sua dureza superficial. A identificação da frente ou profundidade de carbonatação requer ensaios específicos.

2.2 RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA

2.2.1 Definições gerais sobre resíduos sólidos

Segundo a NBR 10004/2004, os resíduos sólidos são materiais nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem urbana, industrial, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ainda de acordo com a referida norma, os resíduos sólidos podem ser classificados conforme as substâncias contidas no resíduo e o processo de produção do resíduo, como:

- a) Resíduos classe I – Perigosos
- b) Resíduos classe II – Não perigosos:
 - a. Resíduos classe II A – Não inertes.
 - b. Resíduos classe II B – Inertes.

Os resíduos da construção civil, em geral, são materiais semelhantes aos agregados naturais e solos, sendo classificados como resíduos de baixa periculosidade e enquadrados como resíduo Classe II-A. “Porém, o grande impacto está relacionado ao grande volume de resíduo gerado, pois podem representar de 50 a 70 % da massa de resíduos sólidos urbanos” (BRASIL, 2012).

Ainda de acordo com a resolução Nº 307 da CONAMA, o gerador do resíduo deve ser responsável pelo gerenciamento dos resíduos. Essa resolução representa um grande marco legal, pois determina a responsabilidade do gerador, estabelece a classificação dos resíduos, encaminhamento para reciclagem e a devida disposição final (BRASIL, 2012).

2.2.2 Definições gerais sobre cerâmica vermelha

Desde as antigas civilizações as argilas são utilizadas nas mais diversas atividades, principalmente para fins domésticos e construtivos. Com a evolução da tecnologia esse material foi sendo gradativamente aperfeiçoado, assim foi difundida o seu processo de queima para adquirir durabilidade e rigidez (ROSSA, 2009 *apud* RAMOS, 2015). De acordo com Petrucci (1975), os povos assírios e caldeus utilizavam tijolos cerâmicos para obras monumentais como os Palácios de Khorsabad e Sargão. Já na Pérsia, o tijolo era utilizado para casas populares e no Egito, apesar de as pirâmides serem construídas com a utilização pedras, os operários que trabalharam nas suas construções moravam em casas de tijolos.

Atualmente, a grande abundância de jazidas de argila e seu baixo custo possibilitou que esse material fosse utilizado como material de construção civil. Esse material na presença de água pode ser facilmente moldado, facilmente secado e endurecido na presença de calor.

De acordo com Verçoza (1987) *apud* Grigoletti (2001), a cerâmica vermelha é constituída por produtos oriundos da argila ou misturas contendo argila, as peças são submetidas, nesta ordem, aos processos de moldagem, secagem e queima. Segundo Petrucci (1975) a argila é um material composto principalmente por compostos de silicatos e alumina hidratados, as diferentes espécies de argilas, consideradas como puras, são na verdade misturas de diferentes hidrossilicatos de alumínio, denominados de materiais argilosos.

Estes produtos caracterizam-se pela cor vermelha e são representados por tijolos, blocos, telhas, tubos, agregados leve de argila expandida e outros (SEBRAE, 2012).

2.2.2.1 Produção de resíduo de cerâmica vermelha

O Brasil dispõe de importantes jazidas de minerais industriais de uso cerâmico, cuja produção está concentrada principalmente nas regiões sudeste e sul, onde estão localizados os maiores polos cerâmicos do país. No entanto, outras regiões têm apresentado certo desenvolvimento dessa indústria, em especial o nordeste, devido, principalmente, à existência de matéria-prima, energia viável e mercado consumidor em desenvolvimento (ANFACER, 2012). Segundo a Associação Brasileira de

Cerâmica (ABC), existem mais de 11 mil empresas produtoras de cerâmica vermelha distribuídas por todo o Brasil.

Em dados à nível global, após a queima as perdas podem variar de 5% a 20%, de acordo com o tipo de indústria. No Brasil, existem 22 tipos de indústrias, estima-se que o valor, em média, das perdas são cerca de 10%, o que equivale aproximadamente 200 kg ou 0,2 toneladas de fragmentos por milheiro, considerando o peso médio de 2 mil kg por milheiro (MME, 2009). De modo geral, existem dois tipos de perdas, a perda gerada na conformação da peça, sendo que esta pode ser reincorporada ao processo fabril e as perdas pós-queima, estas não podem ser reincorporadas (FERREIRA, 2014).

Como citado no tópico anterior, o montante de resíduo gerado e sua disposição final adequada é de total responsabilidade do seu gerador. Entretanto, na maioria das vezes os resíduos gerados são depositados nos leitos de rios, à beira de estradas e acumulados nos pátios da própria indústria.

Devido ao grande volume de resíduo gerado pela indústria de cerâmica muitas são as pesquisas desenvolvidas que visam reutilizar e reciclar os resíduos gerados nas mais diversas formas, como agregados para concreto, substituinte do cimento, leito de pavimentação, entre outras.

2.2.2.2 Produção de concreto e argamassa com adição de resíduo cerâmico

Fonseca, Costa e Conciani (1998) afirmam que o resíduo cerâmico depois de triturado, produz um pó com propriedades pozolânicas podendo ser incorporado à massa do concreto, melhorando a composição da mistura. Sugerem também, a transformação do resíduo em agregado para fabricação de concretos, com desempenho parecido ao do concreto convencional.

De acordo com Sales e Alferes Filho (2014), o índice de atividade pozolânica do resíduo de cerâmica vermelha corresponde a 76,9% em reação com o cimento Portland. Concluindo-se que o pó gerado apresenta consideráveis atividades pozolânicas.

A incorporação do RCV à massa de concreto pode provocar características diferenciadas em comparação com o concreto convencional, como toda adição pozolânica, estudos comprovam que esta também pode alterar propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, como apresentado abaixo:

- **Trabalhabilidade:**

Vieira (2005) observou que quanto maior o teor de substituição do cimento pelo RCV, menor a trabalhabilidade das argamassas apresentando uma tendência linear. Este fato pode ser explicado devido o RCV apresentar uma maior superfície específica comparada a do cimento necessitando, portanto, de uma maior demanda de água para envolver seus grãos.

Sales e Alferes Filho (2012) concluíram que a substituição de 20% do cimento pelo RCV seria considerada como teor ótimo por promover melhor combinação do efeito fíler, sem tanto prejuízo à trabalhabilidade. Já o teor de substituição de 40% apresentou prejuízo a consistência da massa, exigindo uma grande demanda de aditivo superplastificante chegando próximo ao limite permitido pelo fabricante.

- **Resistência:**

Jerônimo (2014) concluiu que embora o RCV seja considerado um material pozolânico, observou-se que quanto maior o teor de substituição maior a perda de resistência, uma vez que através do ensaio de compressão verificou-se que o teor de substituição de 10% apresentou uma perda média de resistência de apenas 12,6%, enquanto o teor que apresentou maior perda foi o de 30%, chegando a um valor médio de 16,9%.

Resultados semelhantes foram obtidos por Carneiro, Moura e Leite (2009) após a análise do difratograma de raios X, onde também foi verificada uma característica reativa da amostra de material cerâmico, utilizando resíduo cerâmico em substituição parcial ao cimento na fabricação de argamassas. Os teores de substituição utilizados foram de 10% e 20%, a partir dos ensaios, foi observado que a argamassa com o menor teor de substituição apresentou um ganho de resistência de 19%, entretanto a argamassa com o maior de substituição apresentou uma queda de 5% na resistência.

- **Absorção de água e Porosidade:**

Souza (2011), observou que houve uma variação de absorção de acordo com o aumento do teor de substituição. Foram analisados os teores de substituição de 10%, 20% e 30%, os dois primeiros apresentaram um decréscimo de respectivamente

2,84% e 30,92%, enquanto o último houve um incremento de 4,32% no teor de absorção.

Enquanto Sales e Alferes Filho (2012), avaliaram a porosidade para as misturas de 10%, 20% e 40% de substituição, para as misturas com 10% e 40% foi obtido um valor de 5,6% e 0,4, respectivamente, inferiores ao concreto referencial, enquanto a mistura com 20% apresentou um incremento de porosidade de 2,9%.

- Durabilidade:

Pôde-se verificar através do estudo de Jerônimo (2014), que os concretos com maiores teores de resíduos de cerâmica vermelha apresentaram uma maior frente de carbonatação. Analisou-se concretos com teores de resíduo de 10%, 20% e 30% onde apresentaram coeficientes de carbonatação com valores de 0,58, 0,61 e 0,95, respectivamente, enquanto o concreto referencial apresentou um valor de 0,55. Concluindo-se que a substituição de cimento por RCV não produz resultados satisfatórios quanto a resistência a penetração do CO₂ o concreto.

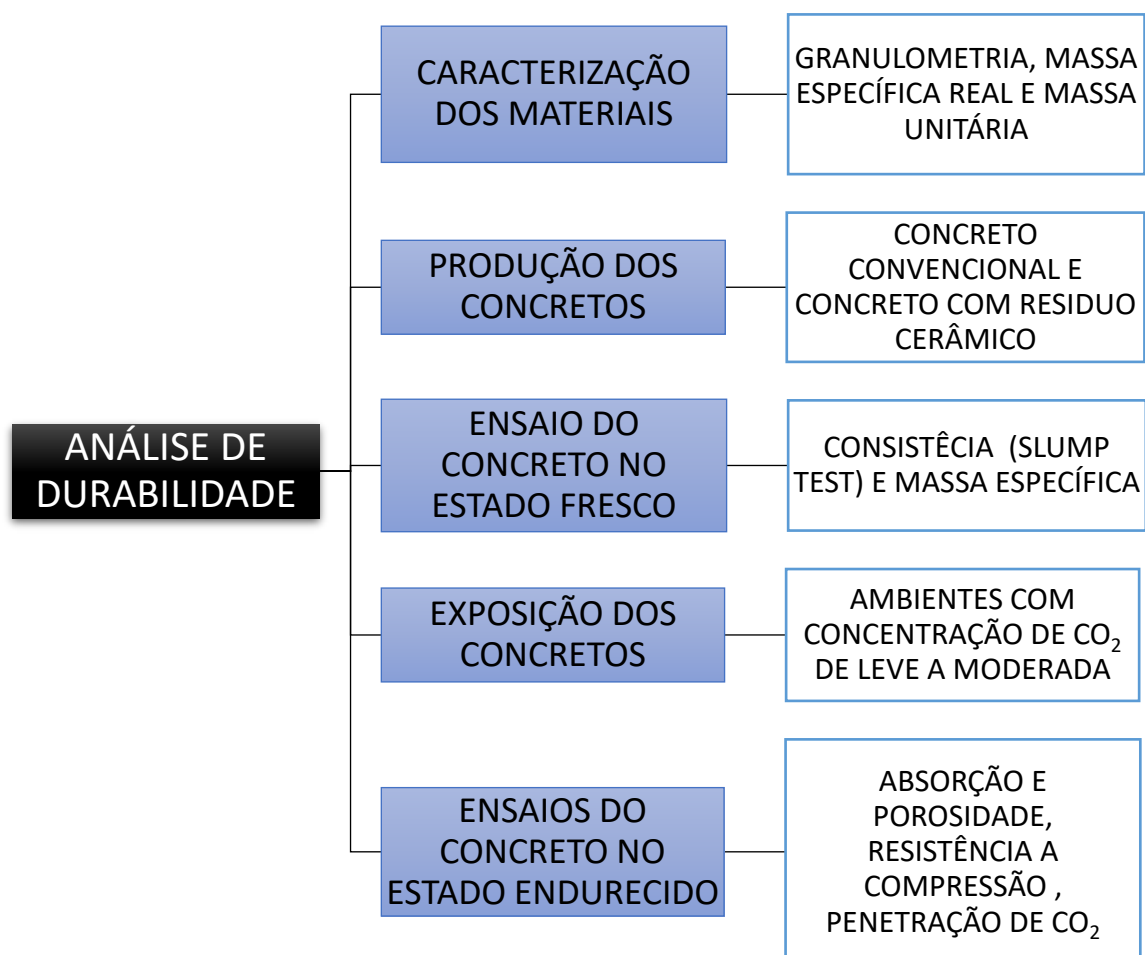
Quanto a penetração de cloretos o mesmo autor concluiu que o RCV apresenta um efeito positivo quanto ao período de despassivação da armadura, ficando evidente que quanto maior o teor de substituição, maior o tempo necessário para despassivação do aço. Teores de substituições de 20 e 30% aumentaram esse período em cerca de 43% e 62%, respectivamente, em relação ao concreto referencial, representando um resultado bastante positivo do ponto de vista econômico e ambiental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para atender os objetivos descritos anteriormente.

A metodologia utilizada para análise da durabilidade dos concretos produzidos, seguiu o fluxograma mostrado na Figura 4. Onde primeiramente foi realizada a caracterização dos materiais (cimento, resíduo, agregado miúdo e agregado graúdo), posteriormente a produção dos concretos, foram realizados os ensaios de desempenho no estado fresco e após a cura e exposição foram realizados os ensaios no estado endurecido.

Figura 4 - Fluxograma de pesquisa



Fonte: Autor (2017).

3.1 LOCAIS DA PESQUISA

A produção do concreto, a confecção dos CP's (corpos de prova) e os ensaios de consistência do concreto (slump test), massa específica, absorção e porosidade e resistência à compressão foram realizados no Laboratório de Construção Civil localizado no Instituto Federal do Rio Grande do Norte - IFRN, campus Mossoró. O ensaio de durabilidade foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção na Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, campus Pau dos Ferros. Os corpos de prova que participaram do ensaio de durabilidade foram expostos em três diferentes ambientes com moderada a baixa concentração de CO₂, no município de Pau dos Ferros – RN.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Agregado miúdo

Para a fabricação das amostras de concreto, como agregado miúdo foi utilizado areia natural fornecida pela UFERSA, previamente peneirada na peneira de abertura 4,75mm.

A fim de obter a caracterização desse material foi realizado os ensaios de granulometria e massa específica. Os ensaios das massas específicas seguiram os procedimentos descritos na NBR NM 52/2009 e na NBR NM 45/2006 estas normas têm como objetivo “estabelecer o método de determinação da massa específica real e da massa unitária, respectivamente, dos agregados miúdos destinados a serem usados em concreto”. Para a realização de cada ensaio foram utilizadas duas amostras.

O ensaio para obtenção da granulometria foi realizado seguindo os procedimentos descritos na NBR 248/2003, que tem como objetivo determinar a distribuição granulométrica do solo, ou seja, busca estabelecer a porcentagem que cada faixa de dimensão de grão representa na amostra. Como recomenda a norma, foram realizados ensaios para duas amostras. Por fim, os dados foram obtidos a partir do Método da Curva.

3.2.2 Agregado graúdo

Foi utilizado como agregado graúdo brita granítica, também fornecida pela UFERSA, sendo utilizada a fração passante na peneira de abertura 75 mm e retida na peneira de abertura 4,75 mm.

A caracterização foi obtida a partir da realização dos ensaios de granulometria e massa específica. Os ensaios executados para obtenção da massa específica real e da massa unitária seguiram as metodologias descritas na NBR NM 53/2009 e na NBR NM 45/2006, respectivamente, as quais possuem como objetivo “estabelecer o método de determinação da massa específica real, e da massa específica aparente, destinados ao uso em concreto”. Foram utilizadas duas amostras para cada ensaio.

Os ensaios realizados para obtenção dos dados de granulometria, foram desempenhados cumprindo os procedimentos descritos na NBR 248/2003. Após repetido o ensaio para duas amostras, como exige a norma, as informações finais foram processadas fundamentadas no método da curva.

3.2.3 Cimento

Para a fabricação das amostras de concreto, convencional de com resíduo cerâmico, foi utilizado Cimento Portland CP-V ARI RS da Marca Mizu, esse tipo de cimento é caracterizado por sua alta resistência inicial podendo atingir 20Mpa decorrido apenas um dia da cura. A escolha do tipo CP-V ARI RS se deu pela sua alta resistência a sulfatos, ou seja, não é altamente resistente ao agente agressivo CO_2 , objeto de estudo, além de ser o cimento com o menor teor de adições em fábrica.

A caracterização deste material foi baseada a partir de trabalhos já realizados com o mesmo tipo e marca de cimento, em razão do não fornecimento dos dados pela fábrica. Desta maneira, de acordo com Cavalcanti e Ribeiro (2013), a sua granulometria foi determinada pelo sedígrafo Horiba CAPA-700 e a sua massa específica foi mensurada pelo método do picnômetro de hélio, utilizando um aparelho Accupyc 1330 V2.01 – Micrometrics.

3.2.4 Resíduo cerâmico

O resíduo cerâmico utilizado foi obtido a partir da fragmentação de blocos cerâmicos (tijolos furados) provenientes da cerâmica Torres, localizada na cidade de Mossoró. Para sua caracterização e possível utilização como material pozolânico, foi necessário que o mesmo passasse por um processo fragmentação e posterior moagem. A fragmentação inicial do material foi realizada manualmente com o auxílio de um martelo obtendo dimensões variadas. Posteriormente, o resíduo fragmentado foi submetido ao processo de britagem com duração de 30 min, no aparelho Los Angeles, como mostra a Figura 5. Visando a obtenção de uma finura adequada, foi utilizado apenas o material passante na peneira com abertura de 75 μ m (nº 200).

Para a caracterização os dados de massa específica, massa unitária e área específica das amostras foram obtidos seguindo a metodologia da NBR NM 23/2001, e NBR 16372/2015, respectivamente.

Figura 5 - Equipamento Los Angeles



Fonte: Autor (2017).

3.2.5 Água

A água de amassamento utilizada para fabricação das amostras de concreto foi obtida a partir da rede de abastecimento local.

3.3 DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

3.3.1 Escolha do traço e dosagem

A fim de avaliar e comparar o desempenho e as propriedades do concreto com RCV, com o desempenho de um concreto convencional, foi definido previamente um traço referencial de proporcionalidade em massa de 1:2:3 (cimento, areia e brita) para uma relação água cimento de 0,65. A partir do traço referencial foi definido o traço do concreto com resíduo cerâmico, com uma porcentagem de substituição de 25% e com mesma relação água cimento.

Corroborando pesquisas anteriormente realizadas como a de Jerônimo (2014) e a de Veira (2004), em que os teores de substituição adotados foram 10%, 20% e 30% e 20% e 40%, respectivamente, foi-se adotado o teor de 25% de substituição para o presente trabalho. Tendo em vista que no estudo de Vieira (2005) para ambos os teores houve uma perda de resistência, enquanto que no estudo de Sales e Alferes Filho (2012) o teor de 20% apresentou um aumento dessa propriedade, optou-se em analisar o concreto com teor de 25% de substituição, devido o desconhecimento das suas propriedades, enriquecendo a literatura a cerca deste tema.

O traço referencial adotado foi definido de acordo com estudos prévios como o de Silva (2015), os quais afirmam tratar-se de um traço econômico, com boas características mecânicas e boa trabalhabilidade. Após a definição dos traços foi calculado a quantidade dos materiais a serem utilizados para a confecção dos 44 corpos de prova (CP's), sendo 14 para cada idade e dois reservas. O levantamento do consumo de materiais pode ser conferido na Tabela 4, em que se define a nomenclatura dos corpos de prova como CP0 e CP25, referindo-se a amostras com substituição de 0% e amostras com substituição de 25%, respectivamente.

Tabela 4 - Proporção e consumo dos materiais utilizados

CONCRETO	Proporção Unitária (em massa)				Consumo (Kg/m³)			
	Cimento	Areia	Brita	RC	Cimento	Areia	Brita	RC
CP 0	1	2	3	0	349,8	699,6	1049,5	0
CP 25	0,75	2	3	0,25	262,4	699,6	1049,5	87,5

Fonte: Autor (2017).

3.3.2 Cálculo dos quantitativos de materiais

A partir da definição dos traços de concreto e a quantidade mínima de CP's, para cada ensaio, foi calculado o quantitativo de cada material a ser utilizado para a confecção das amostras. As amostras de concreto constituíram-se de corpos de prova de forma cilíndrica com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. A Tabela 5 apresenta a quantidade de CP's utilizados para cada ensaio.

Tabela 5 - Quantidade de CP's por traço

Ensaio	Quantidade de CP's		
	28 dias	60 dias	90 dias
Resistência à compressão	3	3	3
Porosidade e absorção	3	3	3
Penetração de CO₂*	1/3	1/3	1/3
Reserva	1		
Total	22		

*Para cada local de exposição foi utilizado no total um CP de cada traço, como a exposição correu em 3 locais diferentes esse valor é multiplicado por 3.

Fonte: Autor (2017).

Após a definição do quantitativo de CP's, a fim de se obter o quantitativo de materiais, o traço unitário foi inicialmente multiplicado por um fator e posteriormente dividido pela massa específica real e então alcançou-se o volume produzido por traço como mostrado na Tabela 6.

Por fim, através do traço aumentado, como apresentado na Tabela 7, foi obtida a quantidade total de materiais necessário para a produção dos dois traços sendo adicionado ainda 10% de cada componente, devido a ocorrência de possíveis imprevistos e ensaios de caracterização.

Tabela 6 - Volume total de concreto produzido

CONCRETO	Proporção			
	Cimento	Areia	Brita	Água
Fator unitário	1	2	3	0,65
Fator multiplicador	13	13	13	13
Traço aumentado	13	26	39	8,45
Massa específica real	3,17	2,635	2,648	1,00
Volume dos materiais	3,81	9,87	14,73	8,45
Volume produzido por traço	37,15 litros			
Volume necessário para 22 CP's	34,54 litros			

Fonte: Autor (2017).

Tabela 7 - Quantidade de material utilizado na produção dos concretos

CONCRETO	Quantidade de materiais (Kg)				
	Cimento	Areia	Brita	Água	RC
CP 0	13	26	39	8,97	0
CP 25	9,75	26	39	8,97	3,25
TOTAL	22,75	52	78	17,94	3,25
TOTAL + 10%	25,02	27,5	85,8	19,73	3,57

Fonte: Autor (2017).

3.3.3 Produção das amostras de concreto

A mistura dos constituintes do concreto foi realizada em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros. Antes de iniciar a produção do concreto a betoneira foi previamente umedecida, evitando que parte da água de amassamento fosse absorvida pela parede interna do equipamento. O procedimento de introdução dos materiais na betoneira e confecção das amostras seguiram a seguinte ordem:

- a) Com a betoneira previamente ligada foi adicionada metade da água de amassamento;
- b) Logo após, foi adicionado 100% do agregado graúdo;
- c) Adicionou-se todo o conteúdo de cimento. Para a confecção das amostras de concreto com resíduo cerâmico, seguiu o mesmo procedimento descrito acima, uma vez que o resíduo foi previamente misturado com o cimento;

- d) Quando se constituiu em uma mistura mais homogênea introduziu-se 100% do agregado miúdo;
- e) Adicionou-se o restante da água de amassamento.
- f) Com todos os materiais no interior da betoneira esta foi mantida ligada, para homogeneização da mistura, por cerca de 5 minutos.
- g) A mistura em estado fresco, foi descarregada em um recipiente de zinco, previamente umedecido;
- h) Realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) de acordo com as prescrições da NBR NM 67/1998;
- i) Por fim, o concreto foi moldado, em moldes previamente lubrificados, seguindo as prescrições da NBR 5738/2015. Para o processo de adensamento foi utilizado um vibrador de imersão;
- j) Após a moldagem, os concretos foram mantidos no interior do laboratório como mostra a Figura 6, decorridas 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e mantidos a cura ao ar e temperatura ambiente até a idade de realização dos ensaios que foram de 28, 60 e 90 dias. Este tipo de cura foi empregado visando uma reprodução aproximada das condições de cura normalmente aplicadas em obras de construção civil.

Figura 6 - Corpos de prova moldados



Fonte: Autor (2017).

3.4 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

3.4.1 Ensaio de massa específica e abatimento do tronco de cone (*slump test*)

O ensaio de massa específica foi realizado segundo as prescrições da NBR 9833/2008, na qual define massa específica do concreto, como massa da unidade de volume do concreto fresco adensado, incluindo o volume de ar aprisionado e incorporado.

Para determinação do nível de trabalhabilidade e consistência do concreto foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone ou *slump test* seguindo os métodos descritos na NBR NM 67/1998. Esta norma tem como objetivo determinar a consistência do concreto fresco, através da medida de seu assentamento com o desmolde da mistura do interior de um tronco de cone, este é preenchido com três camadas de alturas iguais, e adensado com 25 golpes cada camada. Os equipamentos utilizados para realização do ensaio são mostrados na Figura 7.

Figura 7 - Equipamentos utilizados para o Slump Test



Fonte: Autor (2017).

3.5 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

3.5.1 Ensaio de Absorção e Porosidade

Para este ensaio foram produzidos três corpos de prova para cada traço, sendo realizado em todas as idades (28, 60 e 90 dias). Este ensaio tem como objetivo avaliar a velocidade de absorção de água através do aumento de massa, além de permitir a obtenção do índice de vazios. Conforme prescreve a NBR 9778/2005, essas características foram obtidas após a permanência por 72 horas em estufa a temperatura de $(100 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Após o resfriamento, as amostras foram mantidas em imersão de água à temperatura ambiente, durante 72 horas, seguida da imersão em água em ebulição por 5 horas.

3.5.2 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência a compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739/2007, em três corpos de prova, de cada traço e nas três idades (28, 60 e 90 dias). Previamente ao ensaio as amostras passaram por um processo de retificação para regularização da superfície, evitando assim eventuais cargas pontuais. O equipamento utilizado para ruptura dos corpos de prova foi uma Prensa Hidráulica da marca Emic, mostrado na Figura 8. Já para a realização da retificação utilizou-se uma retifica também da marca Emic. Ambos os equipamentos estão localizados no laboratório de Construção Civil do IFRN.

Figura 8 - Prensa Hidráulica



Fonte: Autor (2017).

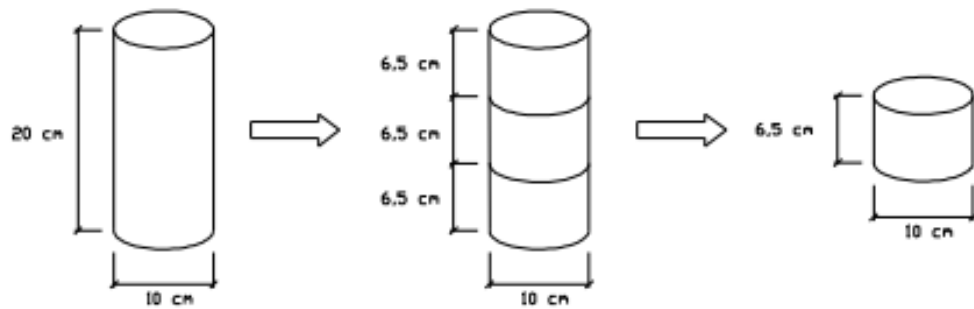
3.5.3 Ensaio de carbonatação

Após a confecção do concreto, desmoldagem dos corpos de prova as amostras que participaram do ensaio de carbonatação foram levadas diretamente para a cidade de Pau dos Ferros-RN. Onde foram expostos a ambiente urbano com concentrações moderada a baixa de CO_2 , até as idades de 28, 60 e 90 dias.

No total apenas seis corpos de prova participaram do ensaio, sendo três confeccionados com o traço referencial e três fabricados a partir do traço com resíduo cerâmico. Deste modo, os corpos de prova foram distribuídos em três locais diferentes, assim em cada ponto da cidade foi locado dois CP's, sendo um para cada traço. Portanto, os locais escolhidos foram a Av. Independência (Local 1) área central do município, a UFERSA (Local 2) e por fim, o Condomínio Portugal (Local 3) situado na Rua Portugal.

Para realização do ensaio os CP's foram cortados diametralmente em três partes de iguais dimensões gerando, portanto, amostras com 6,67 cm de altura cada uma referente a uma idade de ensaio, exemplificado na Figura 9. Os cortes foram realizados com o auxílio de uma serra de disco diamantado, encontrada em marmorarias.

Figura 9 – Esquema de cortes dos CP's



Fonte: Barin (2008).

O ensaio de carbonatação foi realizado por meio da aspersão de solução de fenolftaleína com concentração de 1%, perpendicularmente à superfície do concreto, a fim de verificar a alteração de PH no concreto.

Com a aspersão de fenolftaleína foi possível verificar a frente de carbonatação que consiste no valor médio da espessura da camada incolor. Para medição da frente de carbonatação fez necessário o uso de um paquímetro, sendo realizada 15 minutos após a aspersão da solução. Para cada amostra foram realizadas 3 medições de pontos de profundidade. A Figura 10 mostra um dos ensaios de carbonatação realizados para a presente pesquisa.

Figura 10- Ensaio de Carbonatação



Fonte: Autor (2017).

Com a obtenção os valores da espessura de carbonatação foi calculado os coeficientes de carbonatação para as peças ensaiadas de acordo com o método de Tuutti (1982) apud Medeiros (2015), o qual define esse método como uma interpretação da lei de Fick, em que determina o nível de deterioração das estruturas

de concreto armado por corrosão induzida pelo processo de carbonatação, como mostra a Equação 3.

$$E_{co_2} = K_{co_2} T^{0,5} \quad (3)$$

Onde,

E_{co_2} = Espessura de concreto carbonatada (mm);

K_{co_2} = Coeficiente de carbonatação (mm/semana^{0.5});

T = Tempo (semanas).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

4.1.1 Massa específica real e massa unitária

Neste ensaio, o resíduo apresentou uma massa específica com o valor de 2,635 kg/dm³ e massa unitária com o valor de 1,504 kg/dm³. Em ambos os ensaios os resultados foram obtidos a partir da média de duas amostras, como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados do ensaio de massa específica e massa unitária

Ensaio	Massa Específica Real (kg/dm ³)	Massa Unitária (kg/dm ³)
Amostra 1	2,630	1,495
Amostra 2	2,640	1,513
Média	2,635	1,504

Fonte: Autor (2017).

Os valores obtidos se enquadram na faixa de valores comumente encontrados em algumas literaturas, conforme em Silva (2015), podendo classifica-los como valores satisfatórios.

4.1.2 Análise granulométrica

A partir do ensaio granulométrico, realizado conforme a NBR NM 248/2003, foi possível obter a composição granulométrica, o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado. Os resultados da composição granulométrica atingidos são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição granulométrica do agregado miúdo

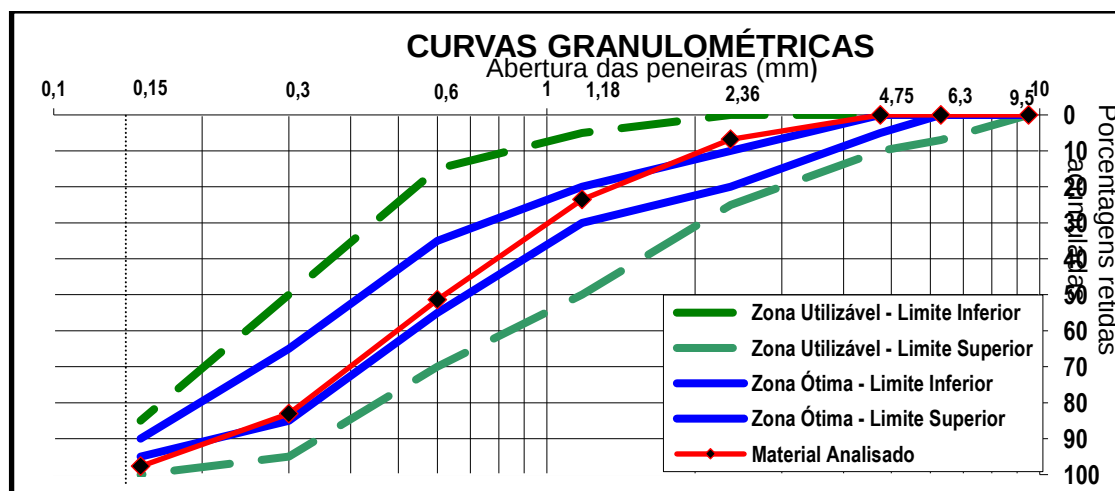
Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Porcentagem Média (%)	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Retida	Acumulada
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0
6,3	0,0	0,0	0,0	0,0
4,75	0,0	0,0	0,0	0,0
2,36	32,3	35,4	6,8	6,8
1,18	82,2	85,2	16,7	23,5
0,6	144,7	134,0	27,9	51,4
0,3	159,5	157,5	31,7	83,1
0,15	70,8	75,4	14,6	97,7
<0,15	10,5	12,5	2,3	100,0
TOTAL	500,0	500,0	100,0	

Fonte: Autor (2017).

Com a análise dos resultados o agregado utilizado na presente pesquisa apresentou um módulo de finura de 2,62 e diâmetro máximo característico de 4,75 mm. Portanto, de acordo com a NBR 7211/2005, na qual define os limites para o módulo de finura de 2,20 e 2,90, o agregado pode ser definido como utilizável para a fabricação de concretos. Através da

Figura 11 é possível observar que a curva granulométrica do material analisado encontra-se totalmente inserida na zona utilizável e quase inteiramente inserida na zona ótima, conforme recomendado na NBR 7211/2005.

Figura 11 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2017).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

4.2.1 Massa específica real e massa unitária

Na Tabela 10 é possível verificar os valores médios correspondentes aos dois ensaios de massa específica. Os valores obtidos estão entre a faixa de valores comumente encontrados em literaturas.

Tabela 10 - Dados do ensaio de massa específica e massa unitária

Ensaio	Massa Específica Real (kg/dm³)	Massa Unitária (kg/dm³)
Amostra 1	2,640	1,387
Amostra 2	2,657	1,383
Média	2,648	1,385

Fonte: Autor (2017).

4.2.2 Análise Granulométrica

A Tabela 11 exibe a composição granulométrica do agregado graúdo utilizado para fabricação do concreto. Os resultados a seguir foram obtidos com a realização do ensaio granulométrico.

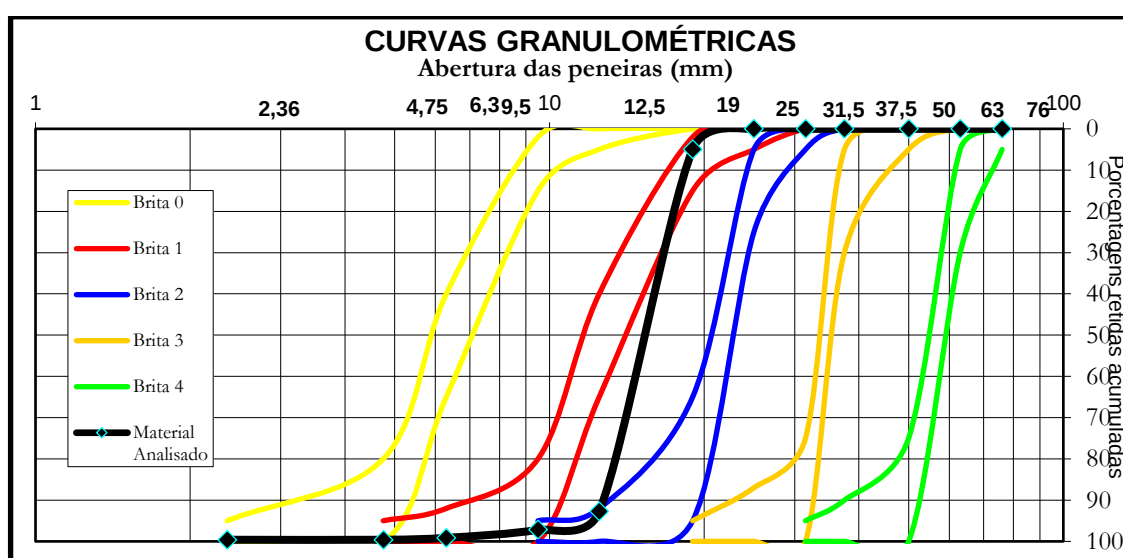
Tabela 11 - Composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Porcentagem Média (%)	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Retida	Acumulada
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0
19	246,0	250,0	5,0	5,0
12,5	4360,0	4420,0	87,8	92,8
9,5	216,0	226,0	4,4	97,2
6,3	104,0	92,0	2,0	99,1
4,75	40,0	6,0	0,5	99,6
<4,75	34,0	6,0	0,4	100
TOTAL	5000,0	5000,0	100,0	

Fonte: Autor (2017).

Além da composição granulométrica foi possível obter também, o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado, com valores de 7,0 e 19 mm respectivamente. A Figura 12 representa a curva granulométrica, pode-se observar que a curva do material analisado se encontra em parte na zona 9,5/25, assim com base na NBR 7211/2009 é possível classificar como brita 1.

Figura 12 - Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2017).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO

De acordo com Cavalcanti e Ribeiro (2013), o cimento Portland CP V RS da marca Mizu, apresentou curva granulométrica de acordo com o especificado pela NBR 5732/1991, verificou-se que porcentagem retida na peneira 75 μm foi de apenas 1,5%, estando dentro do limite sugerido pela norma que é de 12%. A massa específica encontrada foi de 3,17 kg/dm^3 , enquanto a massa unitária apresentou o valor de 1,00 kg/dm^3 . A área superficial apontou um valor de 8924 cm^2/g .

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

Após a realização dos ensaios e análise dos resultados obteve-se os valores da superfície específica, massa específica e a massa unitária do resíduo cerâmico. A

Tabela 12 expõe a média dos resultados obtidos para a massa específica e a massa unitária do material. Os valores apresentados estão entre a faixa de valores encontrados em pesquisas semelhantes.

Tabela 12 - Dados do ensaio de massa específica e massa unitária

Ensaio	Massa Específica (kg/dm^3)	Massa Unitária (kg/dm^3)
Amostra 1	2,670	0,897
Amostra 2	2,650	0,910
Média	2,660	0,903

Fonte: Autor (2017).

Os valores encontrados referentes a superfície específica estão listados na Tabela 13, o valor final foi obtido a partir da média aritmética de quatro ensaios com duas amostras, como recomenda a NBR 16372/2015. Observa-se valores bem abaixo quando comparado com a superfície específica do cimento comum que, segundo Neville (1995), varia entre 3500 e 3800 cm^2/g . O termo superfície específica se refere à área exposta do material por sua unidade de peso. Desse modo, quanto maior a superfície específica de um material maior será sua reatividade com o meio. Portanto, pode-se afirmar que o resíduo de cerâmica apresentou uma reatividade menor que a do cimento.

Tabela 13 - Dados do ensaio de superfície específica

Ensaio	Superfície Específica (cm²/g)
Amostra 1	2800
	2677
Amostra 2	2663
	2792
Média	2734

Fonte: Autor (2017).

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

4.5.1 Ensaio de consistência e massa específica

A partir do ensaio de tronco de cone (slump test), obteve-se as informações referentes ao comportamento plástico do concreto que são apresentadas na Tabela 14. Verifica-se que houve diferença quanto a consistência entre os dois tipos de concreto, ou seja, a adição de resíduo cerâmico diminuiu o nível de trabalhabilidade do concreto, em 10,52%. Corroborando com os resultados obtidos por Junior (2011), onde o concreto com substituição de 20% de resíduo apresentou um abatimento 33,33% menor que o concreto referencial. Esta alteração pode ser causada devido a origem do resíduo cerâmico material derivado da argila, essa caracterizada por sua alta retenção de água.

Tabela 14 - Consistência do concreto

Traço	Abatimento (cm)
CP 0	19
CP 25	17

Fonte: Autor (2017).

Os resultados obtidos a partir do ensaio de massa específica são mostrados na Tabela 15. Observa-se que o concreto com resíduo cerâmico apresentou massa específica com um percentual de 4,76% mais baixo que o concreto de referência.

Desta forma, de acordo com a NBR 8953/2015 ambos os concretos podem ser classificados como concretos de peso normal.

Tabela 15 - Massa específica do concreto

Traço	Massa específica (kg/m³)
CP 0	2474,45
CP 25	2356,69

Fonte: Autor (2017)

4.5.2 Ensaio de absorção e porosidade

A Tabela 16 apresenta o percentual de porosidade dos concretos confeccionados. É possível perceber que a porosidade dos concretos com adição de resíduo cerâmico, em todas as idades, apresentou uma estimativa mais elevada quando comparadas às amostras referenciais. Os concretos com resíduo apresentaram um incremento de 22,72%, 15,87% e 22,59% nas idades de 07, 28 e 60 dias, respectivamente. Fato ocorrido também em pesquisas semelhantes como a de Sousa (2011), onde amostras com 30% de adição de resíduo apresentou um acréscimo de porosidade de 4,32%, apenas nos concretos com substituição de 10% e 20%, observou-se um decréscimo de índice de vazios.

Evento este que justifica a diminuição da massa específica do traço CP 25 quando comparado ao CP 0.

Tabela 16 - Porosidade dos concretos

Porosidade (%)			
Traço	Idade (dias)		
	28	60	90
CP 0	13,69	14,68	14,03
CP 25	16,80	17,01	17,20

Fonte: Autor (2017).

O grau do índice de vazios reflete diretamente na propriedade de absorção de água do concreto, uma vez que a água absorvida se instala nos poros e vazios do concreto, portanto quanto maior a porosidade do concreto maior sua absorção, como

mostra a Tabela 17, onde a absorção das amostras com resíduo também tiveram maiores valores em todas as idades, comparado com o concreto referencial. Apresentando assim um acréscimo de 24,59%, 17,03%, 18,97% nas idades de 28, 60 e 90 dias respectivamente.

Porém quando comparado a Tabela 17 com Tabela 16 percebe-se que absorção de água apontou um incremento maior que o de porosidade, isto pode ser explicado em consequência da natureza argilosa do resíduo cerâmico, material com grande poder de absorção.

Tabela 17 - Absorção dos concretos

Absorção (%)			
Traço	Idade (dias)		
	28	60	90
CP 0	6,14	6,40	6,22
CP 25	7,65	7,49	7,40

Fonte: Autor (2017).

4.5.3 Ensaio de resistência à compressão

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão que foram realizados nos corpos de prova com e sem resíduo, nas idades de 28, 60 e 90 dias. A Tabela 18 expõe os resultados obtidos referente a cada idade do concreto.

Tabela 18 - Resistência à compressão dos concretos

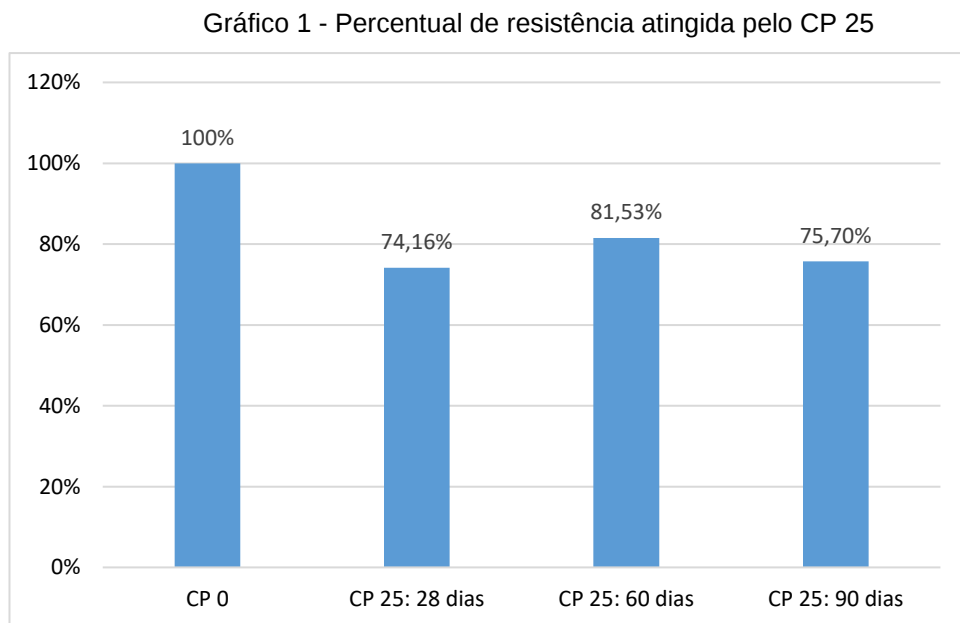
Resistência à Compressão (Mpa)			
Traço	Idade (dias)		
	28	60	90
CP 0	15,09	14,89	15,14
CP 25	11,19	12,14	11,46

Fonte: Autor (2017).

De início observa-se que nenhuma amostra atingiu a resistência mínima para este traço aos 28 dias, que era de 20 Mpa. Este fato pode ter sido causado pelo tipo de cura empregada após a desmoldagem dos CP's, a cura ao ar pode causar

evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, aumentando a porosidade e consequentemente diminuindo a resistência característica do concreto.

Além disso, percebe-se que em todas as idades os CP's com 25% de adição de resíduo apresentaram uma resistência à compressão menor que o concreto referencial. Portanto, as amostras com 25% de resíduo cerâmico na idade de 28 dias, apresentou uma perda de resistência de 25,84%, na idade de 60 dias apresentou perda de 18,47% e de 24,30% na idade de 90 dias. O Gráfico 1 mostra a porcentagem da resistência atingida pelas amostras com adição de resíduo para cada idade, quando confrontada com a resistência referencial.



Fonte: Autor (2017).

Observou-se também uma queda de resistência do traço CP 0 entre as idades de 28 e 60 dias esse fato pode ser relacionado ao mal adensamento do corpo de prova ocasionando a ausência de agregado graúdo em regiões localizadas e uma alta concentração de pasta de cimento.

Em Junior (2011), resultados semelhantes foram obtidos, constatando que em concretos com substituição de 10% obteve-se um ganho de resistência em torno de 2,7% em relação ao CP 0 e as substituições de 20% e 30% tiveram redução da resistência em torno de 11,6% e 16,8% respectivamente.

Ainda segundo Junior (2011), esse fato pode ser causado devido o efeito filler não compensar a perda de resistência pela diminuição da quantidade de cimento que foi substituído por resíduo cerâmico.

Vale ressaltar que embora pesquisas passadas tenham constatado uma considerável tendência pozolânica do resíduo, nesta pesquisa não foram observados incrementos de resistência em idades mais avançadas o que pode ter sido causado por ineficiência na moagem do resíduo, uma vez que este deve possuir uma granulometria e uma superfície específica similar ao do aglomerante utilizado.

4.5.4 Ensaio de carbonatação

As profundidades de frente de carbonatação correlacionadas com os locais de exposição são mostradas na Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21, referente ao ensaio de 28, 60 e 90 dias, respectivamente.

Tabela 19 - Espessura de penetração do CO₂ aos 28 dias

Profundidade de carbonatação aos 28 dias (mm)			
Traço	Locais		
	1	2	3
CP 0	3,33	2,83	3,17
CP 25	6,67	5,33	6,33

Fonte: Autor (2017).

Tabela 20 - Espessura de penetração do CO₂ aos 60 dias

Profundidade de carbonatação aos 60 dias (mm)			
Traço	Locais		
	1	2	3
CP 0	9,33	8,33	9,67
CP 25	12,67	10,0	12,33

Fonte: Autor (2017).

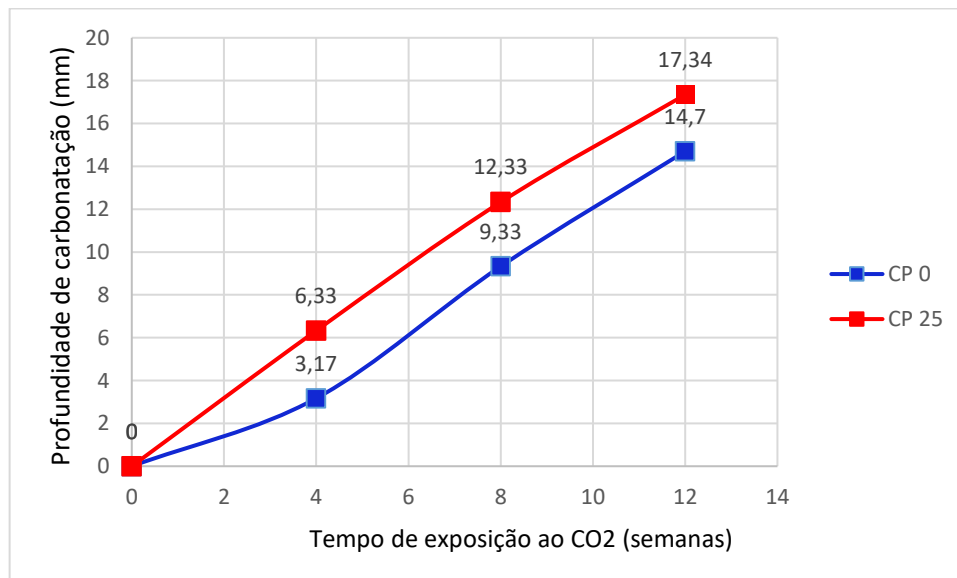
Tabela 21 - Espessura de penetração do CO₂ aos 90 dias

Profundidade de carbonatação aos 90 dias (mm)			
Traço	Locais		
	1	2	3
CP 0	14,70	11,54	15,25
CP 25	17,34	13,26	17,64

Fonte: Autor (2017).

A partir da média das profundidades de penetração do CO₂, foi obtido o Gráfico 1 por conseguinte, foi obtido o coeficiente de carbonatação para cada traço exposto na Figura 13.

Figura 13 - Profundidades médias de carbonatação

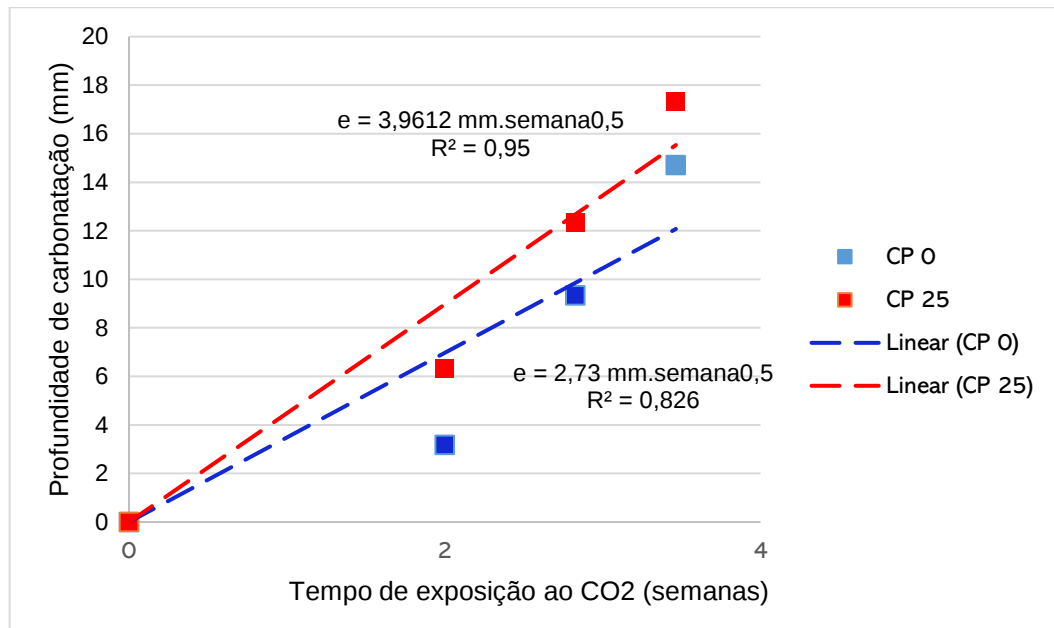


Fonte: Autor (2017).

Percebe-se que na idade de 28 dias a profundidade da camada carbonatada do CP 25 foi de 6,33 mm que representa quase o dobro da espessura da camada do CP 0 que foi de 3,17 mm, retratando um acréscimo de 99,68%. Fato que também se repete na idade de 60 e 90 dias, porém com diferença de menor intensidade, representando um incremento de 32,15% e 17,96%, respectivamente.

A espessura carbonatada em função da raiz quadrada do tempo de exposição, em semanas, resulta em tendência linear. O coeficiente angular da reta representa o coeficiente de carbonatação (K_c).

Figura 14 - Linha de tendência das espessuras médias



Fonte: Autor (2017).

Com base na Figura 14, constata-se que o coeficiente de penetração do CO₂ para o traço CP 0 apresenta valor igual a 2,73 mm.semana^{0,5}, ou seja, inferior ao coeficiente do traço CP 25 que apresentou um valor de 3,96 mm.semana^{0,5}, isto significa que o concreto com resíduo cerâmico apresenta uma maior tendência a sofrer carbonatação que o concreto sem adição de RCV.

De acordo com Jerônimo (2014), estudos já realizados anteriormente comprovam que adições pozolânicas podem trazer resultados positivos ou negativos quanto a durabilidade do concreto. Os efeitos positivos são percebidos quando essa adição promove a redução dos poros aumentando a barreira física para os agentes agressores. O efeito negativo é ocasionado devido a diminuição da reserva alcalina com a substituição de parte do cimento por outras substâncias com menor alcalinidade, diminuindo o recurso químico de defesa à penetração de CO₂.

No presente estudo foi verificado que em todas as idades, independente dos locais de exposição, as amostras de concreto com adição de resíduo de cerâmica vermelha apresentaram uma maior profundidade de carbonatação. Esse fato pode ter sido causado, como comprovado no item 4.5.4, por sua maior porosidade, visto que, quanto maior a porosidade menor a resistência à entrada de CO₂. Comprovando, o efeito físico negativo proporcionado pelo RCV quanto a resistência a penetração de CO₂, em traços com substituição de 25% de cimento.

O efeito químico negativo do resíduo também já foi comprovado em estudos realizados anteriormente como o de Jerônimo (2014), que através de análise e acompanhamento do pH, percebeu-se que ao longo do tempo o mesmo atingiu valores mais baixos nas pastas que continham o RCV.

Deste modo, é possível afirmar que a adição de resíduo de cerâmica vermelha não trouxe melhorias ao concreto quanto a durabilidade à carbonatação, devido principalmente ao aumento do índice de vazios, além dos efeitos químicos comprovados em outros estudos.

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa foi motivada principalmente por âmbitos ambientais e econômicos, tendo como principal visão o reaproveitamento dos rejeitos da indústria de cerâmica vermelha em busca de melhorias quanto a durabilidade do concreto à penetração de partículas de CO_2 em ambiente urbano. Tendo como principal finalidade avaliar e comparar as propriedades do concreto convencional e do concreto com RCV confeccionados com mesma proporção de A/C, submetidos as mesmas condições de produção, adensamento e cura.

A utilização do RCV como adição pozolânica no concreto demonstraram diversas diferenças e conclusões quando confrontadas com as propriedades do concreto convencional, destacando as principais como:

- Os traços de concreto confrontados apresentaram diferença quanto a consistência, ou seja, a adição de resíduo cerâmico diminuiu o nível de trabalhabilidade do concreto, em 10,53%, para substituição de 25%. Esta alteração pode ser causada devido a origem do resíduo cerâmico material derivado da argila, essa caracterizada por sua alta retenção de água.
- O concreto com resíduo cerâmico apresentou massa específica com um percentual de 4,76% mais baixo que o concreto de referência, diminuindo o esforço do peso próprio da estrutura, portando refletindo de forma positiva economicamente. Ainda assim, segundo a NBR 8953/2015 pode ser classificado como concreto de peso normal.
- Em todas as idades as amostras com adição de resíduo apresentaram uma resistência à compressão menor que o traço referencial. Podendo este fato ser justificado devido o efeito fíler não compensar a perda de resistência pela diminuição da quantidade de cimento.
- Os níveis de porosidade e absorção das amostras com resíduo apresentaram-se mais altos comparados com o traço referencial. Percebeu-se que a propriedade de absorção apresentou um acréscimo maior que o de porosidade podendo ser explicado em consequência da natureza argilosa do resíduo cerâmico.
- Constatou-se que o concreto com resíduo cerâmico apresenta uma maior tendência a sofrer carbonatação que o concreto sem adição de RCV.

Através dos ensaios pôde-se constatar que o coeficiente de carbonatação das amostras com resíduo mostrou-se 45,05% mais expressivo que o concreto referencial. Conclui-se, portanto que existe um efeito físico e um químico negativo, proporcionado pelo RCV quanto a resistência a penetração de CO_2 , em traços com substituição de 25% de cimento.

Por fim, de acordo com os resultados no presente trabalho conclui-se que a substituição parcial do cimento por resíduo de cerâmica vermelha não se mostrou como uma alternativa viável quando o principal foco seria aumentar a durabilidade das peças estruturais quanto à penetração de CO_2 . Sendo necessário um estudo mais abrangente e a longo prazo, visando uma melhor avaliação dos efeitos pozolânicos proporcionados ao concreto tocante aos parâmetros de durabilidade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, tem-se a expectativa da realização de novos estudos relacionados à utilização de resíduo de cerâmica vermelha como substituinte do cimento, tangente aos parâmetros de durabilidade. Deste modo, dentre o extenso universo de pesquisa acerca do tema em questão, pode-se sugerir os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Análise para todos os parâmetros explorados nesta pesquisa com teores de substituição diferente do abordado, com 15%, 20% e 30%;
- Avaliar outros fatores referentes a durabilidade do concreto como lixiviação, retração, resistência ao ataque de sulfatos, entre outros;
- Realização de análise quanto aos efeitos físicos e químicos do RCV quando à penetração de CO₂;
- Realização de pesquisas que corroborem a incorporação desse resíduo no concreto, com os impactos ambientais provocados pelas indústrias que o geram, afim de se obter uma viabilidade ambiental e econômica de sua incorporação.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10004. Resíduos sólidos - Classificação Rio de Janeiro, 71 p, 2004.

ABNT NBR 11172. Aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro, 5 p, 1990.

ABNT NBR 11768. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos, 2011.

ABNT NBR 16372. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 11 p, 2015.

ABNT NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 1 p, 2015.

ABNT NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de- prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 13 p, 2007.

ABNT NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT NBR 7211. Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 15 p, 2009.

ABNT NBR 8953. Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 3 p, 2015.

ABNT NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 4 p, 2005.

ABNT NBR 9833. Concreto Fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 11 p, 2008.

ABNT NBR NM 23. Cimento portland e outros materiais em pó –Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 5 p., 2001.

ABNT NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 6 p, 2003.

ABNT NBR NM 45. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 8 p, 2006.

ABNT NBR NM 52. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 6 p, 2009.

ABNT NBR NM 53. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 8 p, 2009.

ABNT NBR NM 67. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 8 p, 1998.

ALMEIDA, S. L. M. de; LUZ, A. B. da. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

ANDRADE, J. J. de O.; HELENE, P. e MEDEIROS, M. H. F. de. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. 2011.

ANDRIOLO, F. R.; SGARBOZA, B. C. **Inspeção e controle de qualidade do concreto**. São Paulo: Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. 64p. 1993.

ANFACER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. **Números confirmam melhor ano para o setor de cerâmicas para revestimento**, 2012.

ARAÚJO, A. de; PANOSSIAN, Z. **Inspeção rotineira de estruturas de concreto armado expostas a atmosferas agressivas**. 2011.

BARIN, D. S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 171 p, 2008.

BATTAGIN, A. F. **Cimento Portland**. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 1v, p. 185-231, 2011.

BAUER, F.L.A. **Materiais de construção**. Editora Livros Técnicos e Científicos, 5ª Edição, Rio de Janeiro, 2000.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 471 p, 2001.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de resíduos sólidos**. Brasília, 2012.

CARNEIRO, V. L.; MOURA, W. A.; LEITE, M. B. **Influência do Uso de Resíduo de Cerâmica Vermelha e Finos de RCD Como Substituição Parcial de Cimento, Para Produção de Argamassas**. Feira de Santana, 2009.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao Estudo de Propriedades do Concreto Auto-Adensável Visando Sua Aplicação em Elementos Estruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CAVALCANTI, L. M.A; RIBEIRO, D. V. **Análises físicas e mecânicas de argamassas de cimento portland com areia contendo cinzas da queima do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo**. In: IX Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 1, p. 26-38, 2013.

CLIFTON, J. R. **Predicting the Service Life of Concrete.** ACI Materials Journal, v. 90, n. 6, p. 611, 1993.

COSTA, J. S. **Agregados alternativos para argamassa e concreto produzidos a partir da reciclagem de rejeitos virgens da indústria de cerâmica tradicional.** São Carlos, 2006.

DA SILVA, T. J. **Predicción de la Vida Útil de Forjados Unidireccionales de Hormigón Mediante Modelos Matemáticos de Deterioro.** Tese de Doutorado, Universidade Politécnica de Catalunha. Espanha, p. 327, 1998.

FERREIRA, R. L. DA S. **Utilização de resíduo de cerâmica vermelha, como agregado graúdo, na produção de concreto.** Mossoró, 2014.

FIESP. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Para a entidade o cenário é preocupante e deve piorar no segundo semestre.** 2015.

FONSECA, J. B.; COSTA, J. S.; CONCIANI, W. **Aproveitamento de rejeitos de cerâmica estrutural para produção de concreto de baixa resistência.** In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. Porto Alegre, 1998.

GOLÇAVES, J. P.; FLHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. DE M. R. **Estudo da hidratação de pasta de cerâmica Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica.** Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. vol 6. p. 83-94. Porto Alegre, 2006.

GRIGOLETTI, G. DE C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 2001.

HAGEMANN, S. E. **Apostila de Materiais de Construção Básicos.** 2011.

HELENE, P. **Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto.** NB, 2001. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos, 2001.

HELENE, P. R. L. **Corrosão de Armaduras para Concreto Armado.** Editora Pini. São Paulo, 1986.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2ed. IBRACON, 2010.

ISAIA, G. C. **A evolução do concreto estrutural.** Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 1v, p. 1-55, 2011.

JERÔNIMO, V. L. **Estudo da durabilidade de concretos com adição de resíduos da indústria de cerâmica vermelha com foco na corrosão de armaduras.** 2014.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção.** In: Seminário Reciclagem de Resíduos Domiciliares, São Paulo, 2013.

JUNIOR, A. DO N. **Avaliação da resistência à compressão de concreto utilizando adição de resíduos de cerâmica vermelha.** Feira de Santana-BA, 2011.

LIMA, F. J. N. DE. **Estudo comparativo da penetração de íons cloreto em concretos convencionais e leves de resistências semelhantes expostos em ambiente marinho.** Mossoró, RN. p.58, 2015.

MEDEIROS, A. G. de. **Análise de durabilidade da ponte do Rio do Carmo utilizando ensaios não destrutivos, norma DNIT e a metodologia GDE/UNB /** Alisson Gadelha de Medeiros. – Natal, RN, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais** – 3ª edição. Português, p. 674, 2008.

MME. **Análise-síntese da transformação mineral no Brasil.** Brasília: SGM, 2009.

MORAES, M. **Adições Minerais ao Concreto.** Notas de aula, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, Brasil, 2012.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete.** London, Longman, 1995.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5 ed., Bookman, Porto Alegre, 912 p, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do Concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção.** Porto Alegre: Globo, 1975.

RAMOS, D. R. F. **Estudo da utilização de resíduos de cerâmica vermelha como agregado graúdo em concreto.** Angicos, RN, 2015.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. DOS S. **Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, jan./mar. 2014. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014.

SEBRAE. **Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas: Impactos ambientais na indústria da cerâmica vermelha.** Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, A. V. DA R. et al. **Influência do processo de cura em concreto convencional em seis idades.** 7º Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação – CONNEPI. Palmas – TO, 8 p. 2012.

SILVA, J. D. J. **Avaliação da potencialidade de incorporação de lodo de uma indústria de produtos de limpeza como adição mineral em concretos de cimento Portland.** Natal, RN, 2015.

SILVA, R. M. L. E. **Gestão ambiental e competitividade no setor da construção civil: Um estudo sobre a aceitabilidade de práticas ambientais no mercado imobiliário.** Natal/RN, 2003.

SILVA, T. J. DA. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro.** 290f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola técnica superior d'enginyers de Camins, Universidade Politècnica da Catalunya, Barcelona, 1998.

Simpósio Internacional de estruturas, Geotecnia e Materiais de Construção. Chile, 2008.

SOUZA, É. M. F. DE. **Utilização de resíduos de placas cerâmicas como aglomerante para concretos.** Juazeiro, CE, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. DAL. **Concreto autoadensável.** São Paulo, 2008.

TUTIKIAN, B.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho.** Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011.

VALVERDE, F. M. **Balanço Mineral Brasileiro 2001: Agregados Para Construção Civil.** 2001.

VIEIRA, A. DE A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos.** João Pessoa, 2005.

WADA, P. H. **Estudo da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto para uso em estacas moldadas in loco /** Patrycia Hanna Wada. - Ilha Solteira : [s.n.], 2010.