



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGEC)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE CERÂMICAS
VERMELHAS COM DIFERENTES TAXAS DE PRÉ-SATURAÇÃO.**

FELIPE JOSÉ LOSADA REIS

Orientador: Paulo Sérgio Lima Souza

**BELÉM
2013**

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE CERÂMICAS
VERMELHAS COM DIFERENTES TAXAS DE PRÉ-SATURAÇÃO.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Banca examinadora:

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo

Prof^ª. Dra. Isaura Nazaré Lobato Paes

BELÉM - PARÁ

2013

*Dedico este trabalho aos meus Pais e Avós,
que sempre me incentivaram e me
acompanharam em todas as minhas
caminhadas e êxitos alcançados.*

AGRADECIMENTOS

Muitos foram os que participaram de forma direta ou indireta nesta caminhada, não mais ou menos importantes, mas em parcelas essenciais, que juntas tornaram esta dissertação possível...

Agradeço primeiramente à Deus pela oportunidade e força durante esta pesquisa.

Ao meu excepcional orientador Paulo Sérgio, pela oportunidade, dedicação, conhecimento transmitido, compreensão, amizade e paciência durante todas as etapas do mestrado. Além de lições que levarei para o resto da vida. Muito obrigado por tudo professor!

Aos professores Isaura Paes, Alcebíades Negrão, Luciana Cordeiro, Cláudio Blanco pela disposição e inúmeras ajudas e orientações durante o mestrado.

A todos os integrantes do Projeto Proengenharias que de alguma forma abriram meu leque de visão sobre a temática da minha pesquisa.

À concreiteira Dibrita, pela doação do agregado graúdo utilizado nesta dissertação.

Ao CNPQ pelo fomento de bolsa de estudo tão almejada por estudantes de pós-graduação.

À Marlí e ao Maneca, incansáveis na organização do LEC e LEMAC, deixando tudo sempre pronto para que pudesse ser utilizado da melhor forma possível.

Ao casal de alunos da FEC/PET, Max e Luciana, que foram essenciais no desenvolvimentoda parte experimental. Sou grato pela ajuda de vocês!

Aos meus amigos e companheiros de graduação, mestrado e vida; Graziela Watanabe, Marlon Oliveira, Wallace Maia, Rodrigo Monteiro e Mariana Lira, que mesmo nos piores momentos encontrávamos uma maneira de rir e acreditar que este momento chegaria. Obrigado AMIGOS!

À minha amada namorada Mariana Maurity pela compreensão, companheirismo e carinho nos maus e bons momentos, e seu pai Clóvis Maurity pelas dicas e ajuda no entendimento de alguns mecanismos desta dissertação.

Aos meus avós dos quais sinto grande admiração e amor! Mesmo não tendo estado tão presente nos últimos meses por conta do pouco tempo.

Aos meus pais e irmão, José, Cristina e Caio pela paciência, amor e compreensão quando o estresse inevitável desta dissertação me tornava uma pessoa insuportável. Obrigado! Amo vocês!

A todos, mais uma vez, muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2 JUSTIFICATIVA	20
1.3 OBJETIVO.....	25
1.3.1 Objetivo Geral	25
1.3.2 Objetivos específicos	25
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	25
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA.....	26
2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	27
2.1 GERAÇÃO, COMPOSIÇÃO E GERENCIAMENTO DOS RCC.	27
2.2 RESÍDUOS MINERAIS DE CERÂMICAS VERMELHAS.	31
2.2.1 Cerâmicas	31
2.2.1.1 Classificação	31
2.2.1.2 Argila: a matéria prima	31
2.2.2 Utilização da cerâmica vermelha na construção civil	33
2.2.3 A reciclagem da cerâmica vermelha como agregado.....	34
3 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS E DO CONCRETO PRODUZIDO COM ESTES.....	38
3.1 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	38
3.1.1 Porosidade	38
3.1.2 Massa unitária, massa específica, granulometria, forma e textura dos grãos.	40
3.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS.....	41
3.2.1 Concreto no estado fresco (Trabalhabilidade).....	41
3.3 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	43
3.3.1 Durabilidade e vida útil.	43
3.3.2 Transporte de agentes agressivos no concreto.....	45
3.3.2.1 Permeabilidade	47
3.3.2.2 Absorção por capilaridade.....	48
3.3.2.3 Difusão e migração	51

3.3.2.4	Avaliação de mecanismos combinados	52
3.3.2.4.1	Resistividade elétrica	52
3.3.2.4.2	Carbonatação.....	56
3.3.2.4.3	Penetração de íons cloretos.....	59
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	62
4.1	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	62
4.2	AQUISIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	63
4.2.1	Dosagem dos concretos.....	69
4.3	ENSAIOS DE LABORATORIO.....	72
4.3.1	Resistência à penetração de íons cloretos (ASTM 1202, 2007).....	73
4.3.2	Resistividade Elétrica Superficial (Método de Wenner; ASTM G57).....	74
4.3.3	Carbonatação.....	76
4.3.4	Absorção de água por capilaridade.....	78
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	80
5.1	CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	80
5.1.1	Abatimento	80
5.2	CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	82
5.2.1	Resistência à compressão axial.....	82
5.2.2	Absorção de água por capilaridade.....	87
5.2.2.1	Influência da presença do AGRC na absorção por capilaridade.....	88
5.2.2.2	Influência da idade, taxa de saturação e fator a/c na absorção por capilaridade.....	93
5.2.3	Carbonatação acelerada.....	97
5.2.4	Penetração acelerada de íons cloreto.....	107
5.2.4.1	Influência da presença do AGRC na penetração de cloretos acelerada..	107
5.2.4.2	Influência da idade, taxa de saturação e fator a/c na penetração de cloretos acelerada.....	108
5.2.5	Resistividade elétrica	113
5.2.5.1	Influência da presença do AGRC na resistividade elétrica.....	114
5.2.5.2	Influência da idade, taxa de saturação e fator a/c na resistividade elétrica.....	115
6	CONCLUSÕES.....	122
6.1	CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES	122
6.2	CONCLUSÕES SOBRE OS RESULTADOS	122

6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
6.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CICLO DE INFLUÊNCIA EM TORNO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.	18
TABELA 1 - QUANTIDADE DE RSU COLETADO POR DIA NAS REGIÕES BRASILEIRAS – ABRELPE (2009)	19
TABELA 2 - QUANTIDADE DE RCC COLETADO NO BRASIL E SUAS REGIÕES,IBGE E ABRELPE (2011).....	22
TABELA 3 - QUANTIDADE DE RCC COLETADO NO BRASIL,IBGE E ABRELPE (2012) 22	22
TABELA 4 - PREVISÃO DE GERAÇÃO DE RCC PARA A EUROPA - EUROPEAN COMMISSION (2011).....	27
FIGURA 2 - QUANTIDADE DE RCC GERADO NAS REGIÕES BRASILEIRAS (IBGE E ABRELPE 2011).	28
FIGURA 3 - QUANTIDADE DE RCC GERADO NAS REGIÕES BRASILEIRAS (IBGE E ABRELPE 2012).	28
FIGURA 4 - CADEIA PRODUTIVA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS- CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2011, P.1846.....	30
FIGURA 5 - VIDA ÚTIL TOTAL DE PROJETO (ELS) É A SOMA DO PERÍODO DE TEMPO ATÉ A DESPASSIVAÇÃO MAIS O PERÍODO DE TEMPO ATÉ A PRIMEIRA FISSURA SUPERFICIAL (LIVRO CONCRETO, CIENCIA E TECNOLOGIA – 2011)	44
FIGURA 6 - CONCEITUAÇÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO TOMANDO POR REFERÊNCIA O FENÔMENO DE CORROSÃO DE ARMADURAS (HELENE, 1997).....	45
FIGURA 7 - (A) AGREGADO ATUANDO COMO “BARREIRA” DIFICULTANDO A PASSAGEM DE ÁGUA. (B) AGREGADO DE MAIOR POROSIDADE COMPORTANDO-SE COMO EXTENSÃO DOS VASOS CAPILARES.	49
FIGURA 8 - VARIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA CLASSE DO CONCRETO E DO TEOR DE MATERIAL RECICLADO (LEVY, 2000)	50
FIGURA 9 - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (A) E PORCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO NATURAL PELO AGREGAGO	

PROVENIENTE DE RESÍDUOS CERÂMICOS (B) (CORREIA, BRITO E PEREIRA – 2006)	50
FIGURA 10 - FATORES E PROCESSOS RESPONSÁVEIS PARA QUE OCORRA A CORROSÃO DE ARMADURAS (ABREU, 1998).....	53
TABELA 5 - CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO RISCO DE CORROSÃO FORAM PROPOSTOS PELO CEB 192 (1988).....	54
FIGURA 11 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO FATOR ÁGUA/CIMENTO E CONSUMO DE CIMENTO - HUGHES <i>ET. AL</i> 1985 APUD WHITING & NAGI, 2003 (1985)	55
FIGURA 12 - REAÇÃO DE CARBONATAÇÃO, FASES E COMPOSTOS (ADAPTADO DE PAULETTI (2009) BASEADA EM THIERY (2005)).....	57
FIGURA 13 - GRAU DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE VENUAT (1977 APUD ROSEMBERG <i>ET AL.</i> 1989).....	58
FIGURA 14 - MECANISMOS DE TRANSPORTE EM ESTRUTURAS MARITIMAS (CONCRETE SOCIETY WORKING PARTY APUD PERRATON <i>ET AL.</i> , 1992)	60
FIGURA 15 - COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS X RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO – (PEREIRA, 2002).....	61
FIGURA 16 - AGREGADO MIÚDO UTILIZADO NAS MISTURAS	64
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MIÚDO.....	64
FIGURA 17 - AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO NAS MISTURAS.....	65
TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO.....	65
FIGURA 18 - MAQUINÁRIO DE ABRASÃO (1) E FORMA DOS AGREGADOS APÓS O PROCESSO DE BRITAGEM POR ABRASÃO (2).....	67
FIGURA 19 - PENEIRAMENTO DO AGREGADO GRAÚDO RECLICADO (AGR)	67
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO RECLICADO	68
GRÁFICO 1 - GRÁFICO DE ABSORÇÃO DO AGRC EM FUNÇÃO DA RAIZ DO TEMPO EM MINUTOS OBTIDO ATRAVÉS DO MÉTODO LEITE MODIFICADO (2001).....	69
FIGURA 20 - AGREGADO CERÂMICO EM PROCESSO DE 100% SATURAÇÃO.....	69
GRÁFICO 2 - GRÁFICO REFERÊNCIA DE DOSAGEM IPT/USP.....	70

TABELA 9 - QUANTIDADE DE MATERIAL UTILIZADO POR TRAÇO	71
TABELA 10 - QUANTIDADE EM QUILOS DE MATERIAIS UTILIZADOS EM CADA TRAÇO (EM LABORATÓRIO)	71
TABELA 11 - RISCO DE PENETRAÇÃO AOS IONS CLORETO DE ACORDO COM A CARGA PASSANTE (ASTM C1202)	74
FIGURA 21 - CORPOS DE PROVA UTILIZADOS PARA O ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETO	75
TABELA 12 - CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO RISCO DE CORROSÃO PROPOSTOS PELO CEB 192 (1988)	75
FIGURA 22 - CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA	77
FIGURA 23 - SEÇÃO TRANSVERSAL DO SISTEMA DE CISLHAMENTO UTILIZADO PARA CORTE DOS PRISMAS	77
FIGURA 24 - AMOSTRA DA SEÇÃO DO CORPO DE PROVA CARBONATADO APÓS ASPERÇÃO DA SOLUÇÃO DE FENOLFTALEÍNA	78
FIGURA 25 - CORPOS DE PROVA NO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	79
TABELA 13 - ABATIMENTOS EM MILÍMETROS OBTIDOS PARA CADA MISTURA ANALISADA	80
GRÁFICO 3 - ABATIMENTOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE MISTURA PARA CADA FATOR A/C	81
TABELA 14 - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA AS IDADES DE 28 E 63 DIAS	82
GRÁFICO 4 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AOS 63 DIAS PARA CADA MISTURA E FATORES A/C	83
GRÁFICO 5 - RESISTENCIA A COMPRESSÃO DAS MISTURAS AOS 28 3 63 DIAS PARA O FATOR ÁGUA/CIMENTO DE 0,65	84
GRÁFICO 6 - RESISTENCIA A COMPRESSÃO DAS MISTURAS AOS 28 3 63 DIAS PARA O FATOR ÁGUA/CIMENTO DE 0,55	85
GRÁFICO 7 - RESISTENCIA A COMPRESSÃO DAS MISTURAS AOS 28 3 63 DIAS PARA O FATOR ÁGUA/CIMENTO DE 0,45	85

TABELA 15 - COMPARATIVO DAS PERDES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM OUTRAS PESQUISAS.....	86
TABELA 16 - RESULTADOS DO ENSAIO DE CAPILARIDADE AOS 28 E 63 DIAS.	87
TABELA 17 - VALORES M EM FUNÇÃO DO TIPO DE MISTURA E O FATOR ÁGUA/CIMENTO UTILIZADO	87
TABELA 18 - ANOVA PARA O A PRESENÇA DO AGRC X ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	88
GRÁFICO 8 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO REFERÊNCIA AOS 28 DIAS.....	89
GRÁFICO 9 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO REFERÊNCIA AOS 63 DIAS.....	89
GRÁFICO 10 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 100% PRÉ-SATURADOS AOS 28 DIAS.	90
GRÁFICO 11 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 100% PRÉ-SATURADOS AOS 63 DIAS.	90
GRÁFICO 12 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 60% PRÉ-SATURADOS AOS 28 DIAS.	91
GRÁFICO 13 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 60% PRÉ-SATURADOS AOS 63 DIAS.	91
GRÁFICO 14 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 80% PRÉ-SATURADOS AOS 28 DIAS.	92
GRÁFICO 15 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 80% PRÉ-SATURADOS AOS 63 DIAS	92
TABELA 19 - TABELA DA ANOVA PARA AS VARIÁVEIS ESTUDADAS	93
GRÁFICO 16 - EFEITO DA VARIÁVEL “IDADE” NA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CONCRETOS COM AGRC.	94
GRÁFICO 17 - EFEITO DA VARIÁVEL “TAXA DE SATURAÇÃO” NA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CONCRETOS COM AGRC.....	95
GRÁFICO 18 - EFEITO DA VARIÁVEL “FATOR A/C” NA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CONCRETOS COM AGRC.....	96

TABELA 20 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA O TEMPO DE EXPOSIÇÃO NA CAMARA, MISTURAS E FATORES ÁGUA/CIMENTO.....	97
GRÁFICO 19 - RETA DE REGRESSÃO LINEAR PARA AS MISTURAS REFERÊNCIA (A), 60% SATURADAS (B), 80% SATURADAS (C) E 100% SATURADAS (D).....	98
TABELA 21 - TABELA DE EQUAÇÕES E r^2 PARA RESTAS DE REGRESSÃO LINEAR.....	99
TABELA 22 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS PRESENTES NO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO	99
GRÁFICO 20 - EFEITO DA VARIÁVEL “TIPO DA MISTURA” NA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	100
GRÁFICO 21 - EFEITO DA VARIÁVEL “IDADE (DIAS)” NA PROFUNDIDADE CARBONATAÇÃO	101
FIGURA 26 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO AOS 3 (A), 7 (B) , 14 (C), 21 (D) E 28 (E) DIAS EM FUNÇÃO DOS FATORES ÁGUA CIMENTO PARA CADA TIPO DE MISTURA.....	102
GRÁFICO 22 - EFEITO DA VARIÁVEL “FATOR A/C” NA PROFUNDIDADE CARBONATAÇÃO	104
GRÁFICO 23 - KCO ₂ EM FUNÇÃO DO FATOR A/C PARA CADA MISTURA.....	105
GRÁFICO 24 - KCO ₂ EM FUNÇÃO DO TIPO DE MISTURA PARA CADA FATOR A/C.....	105
FIGURA 27 - AVANÇO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO ATRAVÉS DE AGREGADOS DE ORIGEM CERÂMICA.....	106
TABELA 23 - VALORES DE CARGA “Q” EM COULOMBS PARA TODAS AS MISTURAS E FATORES A/C.....	107
TABELA 24 - ANOVA PARA O A PRESENÇA DO AGRC X PENETRAÇÃO DE CLORETOS ACELERADA	107
TABELA 25 - RELAÇÃO ENTRE CONCRETOS REFERENCIA E CONCRETOS CONTENDO AGRC SATURADOS.....	108
TABELA 26 - ANOVA DAS VARIÁVEIS ANALISADAS NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM AGRC.....	109
GRÁFICO 25 - EFEITO DA VARIÁVEL “IDADE” NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS....	109

GRÁFICO 26 - EFEITO DA VARIÁVEL “TAXA DE SATURAÇÃO” NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....	110
GRÁFICO 27 - CARGA PASSANT EM COULOMBS PARA TODAS AS MISTURAS EM FUNÇÃO DO FATOR A/C AOS 28 DIAS	111
GRÁFICO 28 - CARGA PASSANTE EM COULOMBS PARA TODAS AS MISTURAS EM FUNÇÃO DO FATOR A/C AOS 63 DIAS	111
GRÁFICO 29 - EFEITO DA VARIÁVEL “FATOR ÁGUA/CIMENTO” NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....	112
TABELA 27 - VALORES MÉDIOS DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A RESISTIVIDADE.....	114
TABELA 28 - ANOVA PARA O A PRESENÇA DO AGRC X PENETRAÇÃO DE CLORETOS ACELERADA	114
GRÁFICO 30 - EFEITO DO TEOR DE AGRC X RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	115
TABELA 29 - ANOVA DAS VARIÁVEIS ANALISADAS NA RESISITIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETOS COM AGRC.....	116
GRÁFICO 31 - EFEITO DA TAXA DE SATURAÇÃO DO AGRC X RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	116
GRÁFICO 32 - EFEITO DA IDADE X RESISTIVIDADE ELÉTRICA	117
GRÁFICO 33 - EFEITO DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO X RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	117
GRÁFICO 34 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA X TIPO DA MISTURA PARA 28 DIAS	118
GRÁFICO 35 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA X TIPO DA MISTURA PARA 63 DIAS	119

RESUMO

A quantidade de resíduos gerados pelo setor da Construção Civil ultimamente vem chamando atenção devido à dimensão com a qual atua como impacto ambiental utilizando materiais de fontes naturais não renováveis e aumentando as quantidades de lixos produzidos pelo meio urbano. No Brasil, esta estimativa gira em torno de 90.000 toneladas geradas por dia. A proposta de utilizar o agregado proveniente de RCC (resíduo de construção civil) como parte integrante de concretos estruturais torna-se ainda mais interessante a partir do momento em que se busca uma diminuição nos custos para a produção do concreto, carregando consigo a mentalidade ambientalista quando poupa a utilização de recursos naturais os quais alguns já começam a se esgotar. Bancos de areia e fontes de seixo começam a se extinguir devido à larga utilização desses agregados nos concretos produzidos em Belém e cidades interiores do estado do Pará. Assim a necessidade de novas fontes de agregados nos faz buscar nos resíduos da construção civil prováveis fontes de agregados que respondam de forma similar aos naturais. Levando em consideração esta proposta, esta dissertação avaliou a durabilidade de concretos produzidos com o agregado de RCC cerâmico, através de ensaios de absorção de água por capilaridade, carbonatação, penetração de íons cloretos e resistividade elétrica. Para tanto, foi substituído o agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico em 50%, onde esta porcentagem de agregado reciclado foi submetida às taxas de pré-saturação de 60%, 80% e 100%. Nos resultados obtidos pode-se observar que a presença do AGRC (agregado graúdo reciclado cerâmico), independentemente do grau de pré-saturação foi significativa em todos os resultados obtidos, fato que embora deixe os concretos mais suscetíveis à perda de durabilidade, apresentou uma mesma tendência de comportamento em relação às misturas referência. Os resultados mais próximos das misturas convencionais foram alcançados pelos concretos que continham agregados cerâmicos pré-saturados com água à uma taxa de 80%.

Palavras-chaves: concreto; resíduo; cerâmica; agregado; graúdo

ABSTRACT

The amount of waste generated by the construction industry has been calling attention lately due to the size with which acts as the environmental impact of using non-renewable natural sources materials and increasing the amounts of waste produced by the urban environment. In Brazil, this estimate is around 90,000 tons generated per day. The proposed use of aggregate from CW (construction waste) as part of structural concrete becomes even more interesting from the moment we are seeking a reduction in costs for the production of concrete , carrying environmentalist mentality when sparing use of natural resources which some are already starting to run out. Banks of sand and pebble sources begin to fade due to the wide use of these aggregates in the concrete produced in Belém and inland cities in the state of Pará. The need for new sources of aggregates makes us seek in construction waste likely sources of aggregates responding in a similar fashion to natural. Considering this proposal, this dissertation evaluated the durability of concrete produced with the addition of ceramic CW through trials of water absorption by capillarity, carbonation, chloride ion penetration and electrical resistivity. To that end, we replaced the natural coarse aggregate by ceramic coarse aggregate by 50%, where this percentage of recycled aggregate was subjected to the rates of pre - saturation of 60 %, 80 % and 100 %. According to the results it can be seen that the presence of RCCA (recycled ceramic coarse aggregate), regardless of the degree of pre- saturation was significant in all the results, the fact that the concrete while leaving more susceptible to loss of durability, it showed a pattern of behavior in relation to the reference mixtures. The closest matches conventional concrete mixtures were made by containing pre- saturated with water at a rate of 80 % ceramic aggregates.

Keywords: concrete; waste; ceramics; aggregate; coarse

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O panorama sócio ambiental contemporâneo vem afirmando cada vez mais a necessidade de se desenvolver soluções para os problemas de falta de sustentabilidade. O avanço natural das sociedades é acompanhado diretamente pelos impactos impostos pelos seres humanos ao meio ambiente de forma cada vez mais intensa. A necessidade de fontes energéticas para suprir a demanda tecnológica e industrial vem crescendo em velocidade surpreendente. Junto a isso, a busca por novos materiais vem sendo constante, tanto para suprir necessidades de melhoria como também para substituir algumas matérias primas que já começam a se esgotar devido à larga utilização.

Muito se fala sobre problemas qualitativos e quantitativos, defender “qualidade” em face da necessidade da “quantidade”. Este dilema tem sido uma constante característica observada no conflito entre organizações ambientalistas e as atividades industriais que de alguma forma atingem o meio ambiente.

O final do último século foi bastante marcado por muitas discussões a respeito de qual definição seria a mais correta para caracterizar o modelo de sustentabilidade. Em função disto, várias organizações não governamentais e nações vêm formulando conceitos que buscam, através de senso crítico, criar teorias para fundamentar sua forma de pensar a respeito da sustentabilidade.

Maurice Strong, no ano de 1973, utilizou pela primeira vez o conceito de eco desenvolvimento (melhorar os níveis de qualidade de vida junto com a preservação ambiental) para caracterizar uma nova política de desenvolvimento (Brusecke, 1996). Ignacy Sachs, em 1993, fundamentou alguns princípios básicos levando em consideração a sustentabilidade social, econômica, ecológica, espacial e cultural. Seguindo esta forma de pensar, estabeleceram-se na Conferência de Ottawa em 1986, cinco requisitos para sustentabilidade: integração da conservação e do desenvolvimento; satisfação das necessidades básicas humanas; alcance de equidade e justiça social; provisão da autodeterminação social e da diversidade cultural; manutenção da integração ecológica (Herrero, 1997).

Em um âmbito geral chega-se a conclusão que o desenvolvimento sustentável está fundamentado em três fatores que são indispensáveis para o desenvolvimento do planeta. Com base na figura 1, a qual ilustra o sistema, percebe-se que o ambiente produz matérias primas, impulsionando o desenvolvimento econômico e social, o que aumenta a necessidade desses elementos naturais, evitando a estagnação do sistema.

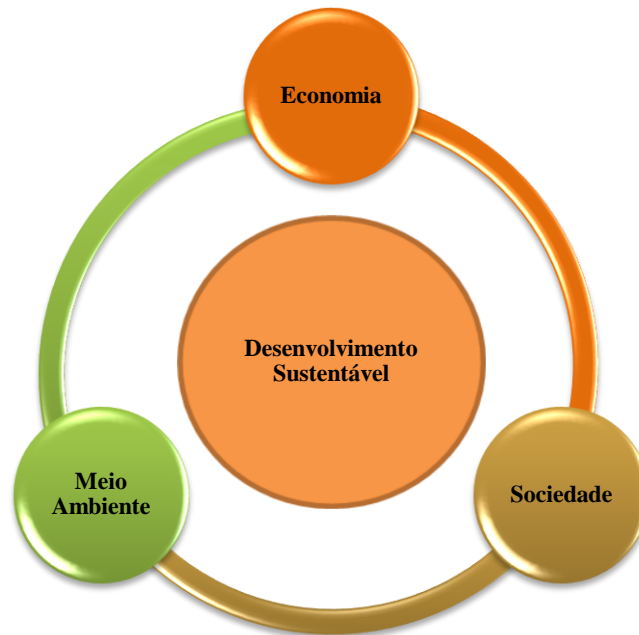


FIGURA 1 - CICLO DE INFLUÊNCIA EM TORNO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.

Atualmente a atividade de reciclar materiais tem sido uma das bases principais do pensamento de desenvolvimento sustentável. Segundo dados da Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABRELPE, 2010), a iniciativa de coleta seletiva no Brasil está presente em 57,6% dos municípios. Vale ressaltar que dentro deste número, as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste apresentam médias inferiores a este valor, em conta partida as regiões Sul e Sudeste, com 77,7% e 79,5% de iniciativa, despontam com índices acima da média do país. Este fato pode ser explicado pelo maior índice de desenvolvimento econômico, social e industrial que caracterizam os municípios destas regiões.

Aliado ao crescimento da produção de resíduos sólidos urbanos está o crescimento populacional, em proporções diretas. Dados Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) afirmam que a população brasileira esteja em

torno de 196 milhões de habitantes e que a população urbana do país seria de 160.876.708 habitantes. A geração de resíduos sólidos esta diretamente ligada ao nível de desenvolvimento da sociedade, países desenvolvidos e mais populosos tendem a produzir maiores quantidades de entulhos quando comparados com países subdesenvolvidos (IPT & CEMPRE, 2000).

Da mesma forma, mas em proporções menores, o mesmo ocorre nas regiões brasileiras, como observado na tabela 1, as maiores quantidades de RSU (resíduos sólidos urbanos) coletados concentram-se nas regiões mais populosas. Em maiores escalas, estima-se que sejam gerados cerca de 2 a 3 bilhões de toneladas de entulho por ano em todo o mundo.

TABELA 1 - QUANTIDADE DE RSU COLETADO POR DIA NAS REGIÕES BRASILEIRAS – ABRELPE (2009)

Região	População Urbana (hab)	RSU Coletado (t/dia)	Índice (kg/habitante/dia)
Norte	11.663.184	12.920	1,108
Nordeste	38.186.895	50.045	1,289
Centro-Oeste	12.479.872	15.539	1,245
Sul	74.661.877	96.134	1,288
Sudeste	23.257.880	20.452	0,879
Brasil	160.876.708	195.090	1,213

Ainda segundo dados da ABRELPE (2009), dentro desse quantitativo de resíduos apresentado, são coletados por ano algo em torno de 31 milhões de toneladas de material proveniente da indústria da construção civil. Conhecidos como RCC (resíduos de construção civil), que são em sua grande parte materiais cerâmicos, restos de concreto e argamassa provenientes de demolições.

1.2 JUSTIFICATIVA

As maiores atividades econômicas do país são potenciais produtoras de diversos tipos de resíduos; industriais, agroindustriais, resíduos agropecuários, metalúrgicos, minerais e seus refugos, dentre outros. Enquadrados como novas fontes de matérias primas para produção de novos materiais, observa-se relevante utilização destes resíduos nos setores de infraestrutura urbana e rural, principalmente nas áreas de pavimentação e construção civil.

Mais especificamente na construção civil, atualmente já se tem larga utilização de uma gama de resíduos provenientes de inúmeras fontes de naturezas distintas utilizados na produção e melhoria de concretos e argamassas.

Quando se fala na inserção de novos materiais na produção de concretos, o interesse por matérias primas enquadrado no conceito de resíduos mostra que estes novos materiais possuem potencialidades peculiares capazes de alterar as propriedades do concreto, tanto físicas quanto mecânicas, desde seu estado fresco até o endurecido.

Dentre estes, pode-se observar a utilização de adições minerais, que geralmente são obtidas a partir resíduos oriundos do meio industrial, gerados em grande escala. O despejo em ambientes impróprios gera riscos de contaminação do meio natural, além da possibilidade de causar danos à saúde daqueles que entram em contato com estes materiais.

A utilização de adições minerais visa substituir de forma parcial o clínquer ou o cimento, barateando o custo dos concretos e argamassas e evitando os danos citados anteriormente. É interessante observar que utilização de adições na produção de concretos, tende a reduzir o consumo energético na produção de cimentos, que pode chegar até 80% (John, 1995), e diminuir a quantidade de CO_2 presente na atmosfera proveniente deste processo.

Estas adições podem ser divididas como materiais pozolânicos, cimentantes e fíler; como exemplo tem-se: escoria granulada de alto forno, cinza volante, sílica ativa, metacaulim, cinza da casca de arroz, argilas calcinadas e o pó de quartzo. Cada exemplo citado, embora atuem de forma semelhante, possui características únicas, determinadas principalmente por sua composição físico-química.

É importante ressaltar que os estudos a respeito de resíduos e suas utilizações em concretos vão bem além do uso de resíduos industriais como substituição parcial do cimento. A utilização de materiais como borracha de pneus, lama vermelha, isopor, garrafas pet, fibras vegetais, lodo orgânico e muitos outros, vêm tentando suprir a busca de novas tecnologias e materiais reciclados que ainda possuem lacunas pouco abordadas no que se diz respeito à obtenção de “agregados reciclados”. Os materiais citados anteriormente são exemplos de prováveis matérias primas com potencial de submissão a tratamentos capazes de transformá-los e reutilizá-los como agregados.

A interligação entre os termos sustentabilidade, resíduo, agregado e potencialidade, chama atenção e remete este estudo à indústria que mais produz e despeja resíduos no meio urbano no Brasil: a construção civil. Cerca de 70% a 80% em volume dos resíduos sólidos presentes nos centros urbanos são provenientes dos canteiros de obra (JOHN, 1995), e a tendência, devido ao crescimento do setor imobiliário no Brasil, é que esta porcentagem se mantenha ou até cresça.

A construção civil é uma indústria reconhecida como uma das mais importantes para o desenvolvimento econômico e social, embora ainda se posicione como grande geradora de impactos ambientais pelo consumo de recursos naturais ou pela geração de resíduos. Nesta última década pode-se observar, principalmente nos centros urbanos, o avanço do ramo imobiliário e o surgimento de novos empreendimentos em grande escala.

Embora tenha impulsionado a criação de emprego e infraestrutura, diretamente proporcional foi o crescimento da taxa de RCC produzido. Com isso, tem-se cobrado das empresas de construção civil um desenvolvimento sustentável consciente, e menos agressivo ao meio ambiente. Esta proposta, embora antiga, ainda não tem sua aplicação executada de forma satisfatória, por ser uma questão bastante complexa que requer grandes mudanças culturais ainda não totalmente difundidas nos canteiros de obra.

A tabela 2 mostra que de 2009 para 2010, segundo dados do IBGE e ABRELPE (2010), houve um crescimento 8,7% na quantidade de RCC produzido no Brasil.

TABELA 2 - QUANTIDADE DE RCC COLETADO NO BRASIL E SUAS REGIÕES, IBGE E ABRELPE (2011)

Região	2009	2010		
	RCD Coletado (t/dia)/ Índice (Kg/hab/dia)	População Urbana (hab)	RCD Coletado (t/dia)	Índice (Kg/habitante/dia)
Norte	3.405 / 0,297	11.663.184	3.514	0,301
Nordeste	15.663 / 0,412	38.816.895	17.995	0,464
Centro-Oeste	10.997 / 0,918	12.479.872	11.525	0,923
Sudeste	46.990 / 0,632	74.661.877	51.582	0,691
Sul	14.389 / 0,630	23.257.880	14.738	0,634
BRASIL	91.444 / 0,576	160.879.708	99.354	0,618

Dados mais recentes da ABRELPE (2012) mostram que ainda é crescente a quantidade de resíduos de construção e demolição no Brasil. No panorama divulgado a respeito dos dados do ano de 2011 (tabela 3), observou-se que a geração de RCC cresceu de 99.354 toneladas para 106.549 toneladas por dia de 2010 para 2011. Fato que exige ainda mais a atenção sobre a destinação adequada desse resíduo.

TABELA 3 - QUANTIDADE DE RCC COLETADO NO BRASIL, IBGE E ABRELPE (2012)

Região	2010	2011		
	RCD Coletado (t/dia)/ Índice (Kg/hab/dia)	População Urbana (hab)	RCD Coletado (t/dia)	Índice (Kg/habitante/dia)
BRASIL	99.354 / 0,618	162.318.568	106.549	0,656

Esta potencialidade para geração de RCC por parte da indústria da construção civil pode ser explicada por fatores presentes desde as etapas de planejamento até sua utilização e capacidade de durabilidade das obras. Azevedo *et al.* (2006) divide as fases do ciclo de vida de uma determinada obra em: Construção, manutenção, demolição e reformas. Cada uma destas responsáveis por uma determinada parcela na geração de resíduos. Para Oliveira (2002), os serviços de

demolição e reformas são os seguimentos do ramo da construção civil que propiciam a geração da maior parte dos resíduos provenientes desta indústria.

A utilização de agregados reciclados de RCC na produção de concretos estruturais ou não, vem sendo bastante estudada na última década e impulsionada justamente pela necessidade de se dar uma finalidade útil a grande quantidade de resíduos da construção civil, bem como suprir a possível escassez de fontes de matérias primas naturais.

Embora ainda não completamente difundida e restrita, no que diz respeito ao compósito concreto estrutural, a inserção do agregado reciclado de RCC como parte integrante de pavimentos e concretos não estruturais já vem sendo trabalhada há algum tempo. Quando se pensa a nível estrutural, leva-se em consideração que a larga utilização do mesmo e a existência de um mercado imobiliário em alta remetem a estudos científicos de novas fontes de matérias primas, ou no caso da utilização de RCC, a busca de novos conceitos sobre agregados aliados ao desenvolvimento sustentável.

Inserir resíduos no concreto é interessante a partir do momento que poupa o meio ambiente de uma provável escassez de elementos naturais e recicla aquilo que outrora não tinha destino adequado ou era avaliado apenas como entulho. Alguns países como Japão, Estados Unidos e principalmente os europeus, já utilizam resíduos contando até com normas provenientes de estudos já existentes sobre os mesmos (LEITE, 2001).

No Brasil, esta mentalidade de reuso do RCC ainda é pouco desenvolvida, encontrando barreiras, principalmente culturais, para sua implantação. Este fato deve começar a mudar durante os próximos anos devido ao esgotamento de fontes naturais de matéria prima. Em geral, impactos relacionados à utilização de agregados, estão ligados à atividade extrativista, que é principalmente influenciada pelo baixo nível de formalidade e tecnologia desta atividade. Este processo é geralmente caracterizado por um processo ilegal sem investimentos no controle ambiental e sustentável (JOHN, 2001).

Esta situação já pode ser observada nas jazidas de seixo no interior do estado do Pará, onde o esgotamento de fontes de agregados naturais já começa a preocupar o mercado consumidor, levando até a impedimentos de retiradas em algumas áreas.

A capacidade do concreto composto por agregados reciclados de desenvolver propriedades estruturais dentro dos padrões recomendados pela NBR6118 (ABNT, 2007), está diretamente ligada à quantidade de substituição e propriedades físicas do resíduo utilizado (BANTHIA e CHAN, 2000).

Em particular, devido às suas peculiaridades físicas e químicas, os agregados reciclados são um tipo de material que ainda necessitam de mais estudos que consolidem e possibilitem sua utilização em concretos estruturais. Dentre as principais particularidades dos agregados reciclados, cita-se a taxa de absorção de água como fator indispensável e de grande influência na resistência e durabilidade dos concretos produzidos com este tipo de produto.

É baseada nestas justificativas, que esta dissertação busca contribuir nos estudos a respeito da aplicação dos agregados de RCC em concretos estruturais, focando a durabilidade desses concretos como principal fator motivante, devido à taxa de compensação de água¹ e o teor de substituição do agregado natural por agregados reciclados atuarem como fatores limitantes no desenvolvimento da resistência e durabilidade desses concretos.

¹ A taxa de compensação de água é uma alternativa para minimizar a perda de trabalhabilidade do concreto devido à perda de água absorvida pelo agregado reciclado que geralmente possui maior porosidade em relação a agregados naturais.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação foi produzir concretos experimentais utilizando agregados graúdos provenientes da reciclagem dos RCC, de natureza cerâmica, com diferentes taxas de compensação de água. Para tanto, será avaliado o comportamento quanto a durabilidade destes concretos reciclados por meio dos ensaios de absorção de água por capilaridade, penetração de cloretos, carbonatação e resistividade elétrica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento de concretos com agregados graúdos reciclados cerâmicos quanto a trabalhabilidade e resistência à compressão.
- Analisar a influência da substituição de 50% do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico.
- Avaliar o comportamento dos concretos produzidos quanto à durabilidade através dos ensaios de absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica, carbonatação e penetração de íons cloretos.
- Verificar a influência das variáveis relação água/cimento, idade e taxa de saturação do agregado reciclado, sobre os as misturas produzidas.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Apesar de o agregado reciclado apresentar grande heterogeneidade em suas características, definiu-se que neste trabalho serão utilizados somente os resíduos de origem cerâmica (restos de telhas e tijolos) em substituição de 50% dos agregados graúdos naturais.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA

A estruturação do trabalho se apresenta da seguinte forma:

- O primeiro capítulo é composto pela introdução, a qual é subdividida em: considerações iniciais, justificativa, objetivos e a estruturação da pesquisa.
- O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica relativa os agregados reciclados, faz um breve histórico sobre a cerâmica vermelha, sua utilização na construção civil e a reciclagem do mesmo.
- O terceiro capítulo apresenta as principais características dos agregados de RCC cerâmicos, peculiaridades e utilizações. Também neste capítulo, são apresentados alguns conceitos de durabilidade para concretos convencionais e produzidos com RCC cerâmico em relação a algumas propriedades no estado fresco e endurecido.
- O quarto capítulo descreve todas as etapas do programa experimental bem como o método de avaliação da absorção, ensaios de durabilidade, características dos materiais utilizados.
- No quinto capítulo consta a análise dos resultados dos ensaios de durabilidade correlacionados com as propriedades avaliadas.
- O sexto capítulo apresenta as considerações finais a respeito da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 GERAÇÃO, COMPOSIÇÃO E GERENCIAMENTO DOS RCC.

A busca e a necessidade pelo conhecimento das propriedades dos materiais encontrados na natureza contribuíram de forma intensa para a melhoria da qualidade de vida na terra. No entanto, tais benefícios também remetem a um aumento na demanda de consumo de bens, de melhores e maiores empreendimentos, de infraestrutura urbana e serviço de saúde. Em contrapartida, a forma desordenada como ocorre este avanço traz danos à sociedade, além de contribuir para a produção de grandes volumes de resíduos sólidos, dentre os quais estão os RCC.

Segundo John e Santiago (2001); Leite (2001); Lima (2008), a construção civil é a indústria que consome a maior parte dos recursos naturais e a maior geradora de resíduos nos centros urbanos.

Na tabela 4 constam alguns dados e previsões estatísticas da *European Commission* (2011) mostrando que no ano de 2012 a quantidade de RCC gerada pelos países europeus pode ter atingido pico histórico ultrapassado 500 milhões de toneladas que deve se manter durante toda a década decorrente.

TABELA 4 - PREVISÃO DE GERAÇÃO DE RCC PARA A EUROPA - EUROPEAN COMISSION (2011)

Ano	Estimativa 1 (milhões de toneladas)	Estimativa 2 (milhões de toneladas)
2005	461	461
2006	477	466
2007	487	470
2008	469	454
2009	427	514
2010	413	531
2011	413	535
2012	423	539
2013	434	491
2014	445	496
2015	456	501
2016	467	506
2017	479	511
2018	491	516
2019	503	521
2020	516	526

Dados atuais, publicados pela ABRELPE (2011 e 2012), divulgaram um levantamento a respeito das quantidades de resíduos de construção e demolição

coletados nas regiões brasileiras de 2009 e 2011 mostrados nas figuras 2 e 3, nas quais se observou que em todas as regiões houve um crescimento de RCC gerado.

FIGURA 2 - QUANTIDADE DE RCC GERADO NAS REGIÕES BRASILEIRAS (IBGE E ABRELPE 2011).

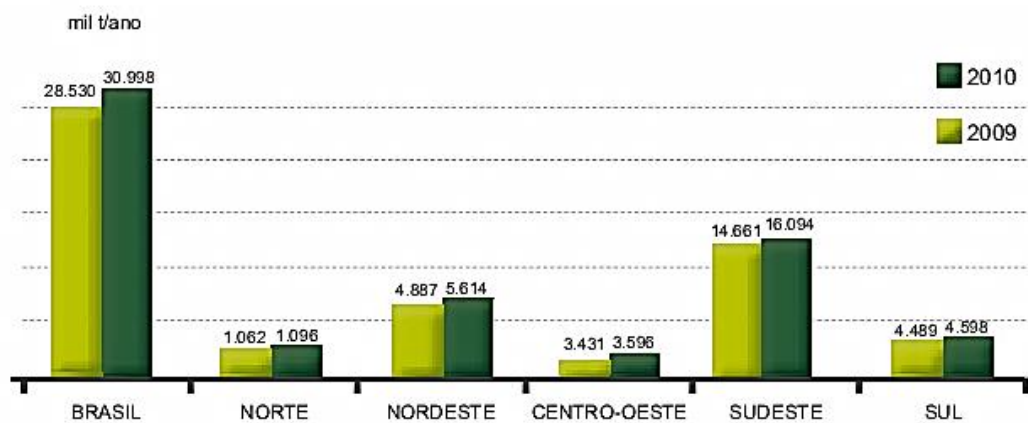
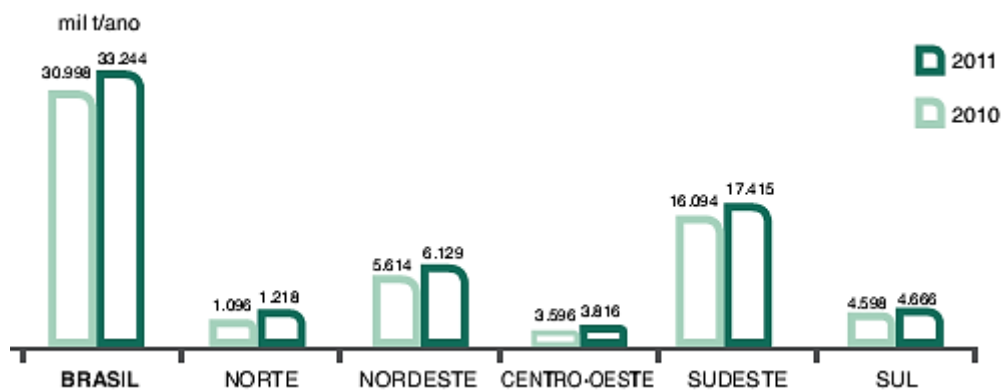


FIGURA 3 - QUANTIDADE DE RCC GERADO NAS REGIÕES BRASILEIRAS (IBGE E ABRELPE 2012).



A composição e a heterogeneidade das características dos RCC variam basicamente em função dos seguintes fatores: sistemas construtivos, materiais regionais, além, do tipo de mão-de-obra e da tecnologia aplicada durante a execução de uma obra (OLIVEIRA, 2002). Estes podem ser constituídos apenas da fração mineral classificados como materiais cerâmicos - tijolos e telha e materiais cimentícios - concretos e argamassas ou ainda podem conter outros materiais como

restos de solos, metais, plásticos, material betuminoso, gesso, pedras, madeira, entre outros.

No Brasil a resolução 307 do CONAMA esclarece no item I do Art. 2º:

Resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha;

Os RCC apresentam grande quantidade de materiais com característica cimentícias e materiais cerâmicos (Dal Molin e Leite, 2002). Em países como EUA, Austrália e Inglaterra a presença da madeira nos RCC é muito maior (QUEENSLAND *et al.*, 2003 *apud*. ÂNGULO, 2005). A fração mineral em relação à massa dos RCC produzidos no Brasil pode chegar até 90% (PINTO, 1999; CARNEIRO *et al.*, 2000 e ÂNGULO, 2005). A presença significativa da fração mineral dos RCC mostra a necessidade da criação de políticas públicas, principalmente nos municípios, que venham garantir o adequado gerenciamento destes resíduos, assim como, o incentivo à prática de reciclagem.

A reciclagem de resíduos é considerada pela maioria das literaturas como a melhor forma para gerenciar os RCC, pois irá contribuir no aumento da vida útil dos aterros, redução dos pontos de descarte clandestinos e diminuição dos custos de gerenciamento dos resíduos sólidos municipais.

Sob esta ótica, como pode ser observado na figura 4, algumas alternativas são imprescindíveis a fim de minimizar os impactos por estes resíduos, sobretudo, ressalta-se a reduzir as perdas e desperdícios em toda a cadeia produtiva da construção civil.

FIGURA 4 - CADEIA PRODUTIVA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS- CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2011, P.1846.



Qualquer processo de transformação dificilmente estará isento de perdas. As frações de perdas estão diretamente relacionadas com o nível instrução tecnológica do processo, bem como a parte operacional humana e a qualidade dos materiais envolvidos.

No caso da construção civil (levando em consideração ainda a figura 4), observa-se a produção de resíduos em todas as etapas. Reduzidas as perdas sem afetar a qualidade, o custo da edificação tende a cair. Mas se o processo não está totalmente livre de perdas, estas também podem desonerar o produto final voltando ao canteiro de obra como material reciclado.

Para Miranda (2005), é extremamente necessária a reciclagem dos RCC em virtude dos problemas ambientais causados desde a sua extração até a disposição final. Levy (2007) ressalta que alguns países da Europa já possuem políticas e pesquisas bastante avançadas a respeito dos RCC.

Atualmente, no Brasil, encontram-se disponíveis algumas normas técnicas para regulamentar as implantações e funcionamento de centrais de armazenamento e beneficiamento de RCC, desenvolvidas pelo CB-2 (Comitê Brasileiro da Construção Civil), conforme colocadas abaixo:

- NBR 15112 (ABNT, 2004) – Resíduos de construção e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto.
- NBR 15113 (ABNT, 2004)– Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- NBR 15114 (ABNT,2004)– Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.

- NBR 15115 (ABNT,2004) – Agregados reciclados e resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
- NBR 15116 (ABNT,2004)– Agregados reciclados e resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural – Requisitos.

2.2 RESÍDUOS MINERAIS DE CERÂMICAS VERMELHAS.

2.2.1 Cerâmicas

2.2.1.1 Classificação

A engenharia e ciência dos materiais classificam os sólidos segundo sua estrutura atômica e composição química em metais, cerâmicas, polímeros, compósitos e semicondutores. O termo em português *cerâmico* vem a partir do grego *keramikos* que traduz “material queimado”, que em altas temperaturas é responsável pela transformação da estrutura cristalina do material.

Cerâmicas são materiais inorgânicos compostos por elementos metálicos e não metálicos que formam suas estruturas atômicas através de ligações totalmente ou predominantemente iônicas, embora tenha algumas vezes a presença de ligações covalentes. Nesta estrutura cátions (metálicos) cedem elétrons para ânions (não metálicos) que adquirem carga negativa.

2.2.1.2 Argila: a matéria prima

Desde o século passado, a principal matéria prima componente das cerâmicas ditas “tradicionais” (tijolos, porcelanas, telhas e azulejos, por exemplo) era a argila.

Barba *et al*, (1997) refere-se ao termo argila como um material de granulometria fina, encontrado misturado a outros materiais na natureza, comportando-se de forma plástica quando misturado com água.

As jazidas de argila podem ser geralmente encontradas nas superfícies de rochas, resultantes da decomposição da estrutura rochosa ali existente, podendo também ser observada sua presença em fendas.

A partir da forma como se dá o depósito da argila, estas podem ser classificadas como residuais (quando o depósito ocorre no mesmo lugar da decomposição) e sedimentares (quando o depósito localiza-se longe da rocha decomposta).

O estudo das argilas e suas composições químicas e estruturas físicas são de fundamental importância para os processos de fabricação dos elementos cerâmicos, estando a qualidade e os tipos de processo diretamente ligados as propriedades da matéria prima (GRUN *et al*, 2005).

Em geral, as argilas são materiais heterogêneos e suas características dependem da sua formação geológica e da localização da extração. As propriedades do produto final são estreitamente relacionadas às características iniciais das matérias primas, como por exemplo, granulometria, plasticidade e composição mineralógica (MACEDO *et al.*, 2008).

Dentre os principais constituintes de uma argila podemos destacar os argilo-minerais, que são compostos por alumino-silicatos (predominantemente alumina, Al_2O_3 , e sílica, SiO_2) com estrutura cristalina complexa. Dentre os mais comuns estão a caulinita $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ que é o mais comumente encontrado, a illita com composição química mal definida devido a presença de impurezas difíceis de serem eliminadas e a montmorilonita $(OH)_2(Al, Mg, Fe)_2(Si_2O_5)_2$ caracterizada pela finura de suas partículas que absorvem grandes quantidades de água entre camadas alcançando elevada plasticidade.

Em geral admite-se como principais características das argilas a plasticidade, a retração e o comportamento quando submetida ao calor. A plasticidade e retração estão diretamente ligadas com a influência do movimento da água pela sua microestrutura. À medida que se acrescenta água, o comportamento plástico tende a aumentar, estando ainda mais presente nos depósitos situados em camadas de extração mais superficiais em função do nível de pressão.

A presença de coloides divide as argilas em gordas (“puras”) e magras (“impuras”) dependendo da quantidade presente na sua composição. As argilas

gordas (com alto índice de coloides) apresentam maior plasticidade e maior deformidade no processo de queima mais suscetíveis ao surgimento de trincas. Já as argilas magras (com baixo índice de coloides) caracterizam-se por maior porosidade e fragilidade devido ao excesso de sílica presente o que dificulta a moldagem quando misturada com água (BAUER, 2000).

Quanto à retração, a perda de água e conseqüentemente a diminuição de volume, ocorre de forma uniforme durante o processo de secagem. Durante este processo os mesmos fatores que aumentam a plasticidade também irão aumentar a incidência do fenômeno de retração.

Durante o processo de queima, a argila passa por alterações físico-químicas que ocorrerão quando submetida a temperaturas acima de 600°C. A queima irá resultar em materiais como tijolos e telhas cerâmicas os quais suas características irão depender não só do processo, mas como também da composição e local de extração da argila que será utilizada como matéria prima.

Assim conclui-se que peças cerâmicas poderão então ter porosidades distintas e conseqüentemente o RCC proveniente das mesmas também poderão apresentar heterogeneidade em função do local coletado.

2.2.2 Utilização da cerâmica vermelha na construção civil

O emprego de produtos cerâmicos obtidos por processos artificiais é anterior à era cristã. Os povos antigos produziam artefatos domésticos por processos de cozimento da argila. A necessidade de construir usando pedras artificiais surgiu em lugares onde não havia disponibilidade de rochas e era abundante a quantidade de materiais argilosos.

A grande diversidade de argilas encontradas na superfície da Terra permite que se obtenham produtos cerâmicos com as mais diversas características tecnológicas, compreendendo os seguintes elementos: tijolos, telhas, porcelanas, velas de filtros, louças sanitárias, grés cerâmico, elementos refratários, isoladores elétricos e até supercondutores. Observa-se que grande parte desses materiais são itens presentes em tarefas da indústria de construção civil.

Em relação a sua matéria-prima a cerâmica vermelha ou estrutural são caracterizados pela cor vermelha de seus produtos. Estes tipos de materiais

cerâmicos são compostos basicamente de argila, em que a massa é tipo monocomponente - só argila e pode ser denominada de simples ou natural (MOTTA, 2001).

O processo de fabricação de cerâmicas vermelhas pode ocorrer de diversas formas, porém semelhantes, utilizando-se quase sempre a argila como matéria prima principal. Na produção das peças há etapas de moagem, britagem, mistura, prensagem, secagem e queima que mesmo normatizadas, ainda existem de forma artesanal inserindo-se no mercado informal em algumas localidades como a exemplos do interior do Pará.

Segundo dados da Secretaria de Geologia e Mineração (Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não-Metálicos - 2012 - ano base 2011), a argila destaca-se como a terceira maior produção mineral brasileira ficando apenas atrás da produção de agregados e ferro. Em 2011, devido ao crescimento de 3,6% da construção civil, foram produzidas 88 bilhões de peças cerâmicas no Brasil, sendo 70% destas, tijolos e blocos.

Baseado nestes dados presume-se que tenha ocorrido um aumento também na geração de resíduos de construção e demolição de origem cerâmica. Logo torna-se ainda mais importante as reflexões sobre as alternativas para gerenciamento e reciclagem desse material, afim de traze-los de volta aos canteiros de obra com novas funções e características.

2.2.3 A reciclagem da cerâmica vermelha como agregado.

A prática de reciclagem das cerâmicas vermelhas como agregado reciclado para a produção de novos concretos e argamassa vem adquirindo maior proporção no setor da construção civil, principalmente no território nacional, apesar de possuírem algumas limitações em virtude de suas propriedades.

Levy (2007) ressalta que a produção de agregados reciclados provenientes da fração cerâmica do entulho de construção em substituição aos agregados convencionais, tem se consolidado no Brasil nos últimos anos. Este crescimento pode ser explicado pelo aumento do número de planos de reciclagem implantados nos principais municípios, geradas tanto pela iniciativa privada como pelo poder público.

A prática de reciclagem dos entulhos, sob o ponto de vista econômico, poderá promover ganhos significativos tanto para o município quanto à sociedade. Esses benefícios estão diretamente ligados à economia do Sistema de Gestão Ambiental Urbano que demandam serviços essenciais como transporte, disposição final e tratamento dos resíduos e ainda a recuperação de áreas degradadas.

Experiência demonstrada por Pinto (1999) relata que é possível promover a qualidade ao meio ambiente e o baixo custo do sistema de limpeza urbana através da implantação da gestão diferenciada dos resíduos de construção civil.

Entretanto, o processo de reciclagem para que seja bem sucedido em termos técnicos e ambientais faz-se necessário a análise de alguns parâmetros a fim de assegurar que os produtos gerados pelos RCC não tragam graves problemas para a sociedade e para o meio ambiente. Assim, devem-se considerar os seguintes aspectos (Andrade; Rocha; Cheriaf, 2004):

- Caracterização completa dos resíduos: conhecimento estrutural, composição e geometria, através de ensaios, tais como, análise química, espectrometria infravermelho, difração de raios X, granulometria e densidade;
- Parâmetros ambientais: ensaio de lixiviação, solubilização, pH; Variabilidade dos RCC;
- Aspectos econômicos e de mercado;
- E outros fatores como a presença de contaminantes, reologia, matéria orgânica.

Embora os agregados reciclados de cerâmica vermelha – ARCV quando utilizados na fabricação de concretos apresentem limitações, devido a influencia que exercem sobre a resistência à compressão e módulo de deformação destes concretos em função de alguns fatores como alta porosidade, forma, textura e proporção. Apesar dessas limitações, embora não seja consenso, muitos trabalhos (Zordan, 1997; John, 2000; Leite, 2001; Levy, 2001) afirmaram sua viabilidade de emprego.

Dessa forma, os resíduos de cerâmica vermelha - RCV, quando submetidos aos processos de beneficiamento adequado, podem ser utilizados na produção de argamassas de assentamento, revestimento (como agregado miúdo reciclado) e

enchimento, assim como, na confecção de concretos (agregados graúdos reciclados) a partir da substituição dos agregados convencionais.

Em relação a sua produção os RCV passam pelo processo de beneficiamento em locais denominadas Plantas de Reciclagem os quais produzem agregados reciclados em todas as frações granulométricas. Observa-se que, em geral, os resíduos coletados nos canteiros de obras ou caçambas coletoras apresentam qualidades inferiores devido a sua heterogeneidade pela presença de contaminantes proveniente do processo de produção, quando comparados aos resíduos obtidos diretamente nos pontos de revenda ou aqueles moldados em laboratório. Para John e Agopyan (2003), se grande parte dos RCC fosse submetido à análise seria classificada como material não inerte, por apresentarem contaminantes de outros resíduos.

Para Dias e Agopyan (2004) as propriedades dos agregados reciclados de telhas de cerâmica vermelha dependem do tipo de matéria prima, do processo de fabricação e das características de reciclagem. Estes agregados apresentam alta porosidade, o que lhes conferem elevada absorção, e fração granulométrica fina. Ensaio realizados com produtos cerâmicos, como agregado reciclado, na produção de argamassas demonstraram desempenho satisfatório quanto à resistência à compressão.

Em estudo realizado por Cabral *et al.* (2007) foi observado que nos concretos reciclados produzidos exclusivamente com agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha, em substituição aos convencionais, houve um melhora significativa na resistência à compressão. Apesar justificado pelo autor, acredita-se que esta melhora deva ser creditada ao efeito pozolânico ocasionado pelo emprego resíduo cerâmico.

Levy (2001), ressalta que os ARCV normalmente apresentaram resistência à compressão inferior em comparação à dos agregados convencionais, podendo ou não, dependendo da sua granulometria e qualidade, desenvolverem reação pozolânica.

Esta reação foi avaliada em estudo realizado por Leite e Dal Molin (2002) no qual foi possível observar que os agregados miúdos de cerâmica apresentaram certa reatividade pozolânica, havendo probabilidade de terem influenciado no

pequeno acréscimo de resistência apresentados pelos concretos experimentais, porém somente um estudo mais aprofundado poderá garantir esta afirmação.

Institutos e Comitês internacionais como o ACI (*American Concrete Institute*) e RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et Matériaux*) publicam diversos artigos e recomendações a fim promoverem a construção sustentável e segura, e um melhor desempenho e custo/benefício para a sociedade, estimulando novas direções de pesquisas e suas aplicações no mundo inteiro (ACI, 2010; RILEM, 2010). Dentre estas pesquisas destacam-se os mais recentes estudos de concretos produzidos com agregados reciclados de RCC.

Estudo realizado por Hordijk e Van der Pluijm (2009) o qual revela que nos países baixos da Holanda há um forte interesse na reutilização de concretos e agregados de alvenaria em novas estruturas de concreto e de acordo com o atual Código holandês é permitido substituir 20% de brita densa por agregados reciclados mistos (combinação de concreto e agregados de alvenaria).

3 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS E DO CONCRETO PRODUZIDO COM ESTES.

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS

Mehta e Monteiro (2008) consideram como características importantes dos agregados: porosidade, composição, granulometria, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão e módulo de elasticidade são fatores que influenciam diretamente no comportamento do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido.

3.1.1 Porosidade

As estruturas na matriz cimentícia do concreto são uns dos principais fatores que influenciam na qualidade e durabilidade. A classificação dos poros depende principalmente de suas características relacionadas à dimensão e capacidade de permitir a percolação de fluidos. Estes influenciam diretamente a permeabilidade do concreto, que se relaciona com os poros, caracterizando os mesmos como abertos ou fechados².

A porosidade esta diretamente relacionada aos poros do material, que são cavidades que têm forma e diâmetro variados. Os agregados naturais, por apresentarem menor porosidade, possuem um grau de absorção considerado insignificante. Por outro lado, nos agregados reciclados esta característica é ponto chave para a obtenção da mistura.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que ao avaliar a influência da porosidade na resistência mecânica do concreto e a capacidade da mesma permitir a

² Os poros podem ser caracterizados em função da sua permeabilidade: poros “abertos” ou interconectados são aqueles que permitem a permeabilidade por fenômenos como capilaridade e evaporação; poros “fechados” ou sólidos são aqueles onde praticamente não há permeabilidade.

penetração de agentes nocivos (permeabilidade), esta relacionada à interconectividade e tamanho dos poros e não a porosidade total do concreto.

De forma geral, os agregados reciclados são mais permeáveis apresentando fissuras na sua superfície, além de serem menos densos e mais fracos o que lhes conferem alta taxa de absorção de água quando comparados aos agregados naturais.

Em relação ao percentual de absorção dos agregados reciclados, resultados obtidos por Poon, Kou e Lam (2007) revelaram que, normalmente, os agregados reciclados de RCC possuem taxa de absorção de água muito maior que os agregados convencionais, variando esta taxa em torno de 3% a 10%, enquanto que os agregados convencionais este percentual varia de 1% até 5 %.

Esta alta porosidade é ainda mais evidente quando se tem o RCC composto unicamente de material cerâmico, visto que a sua estrutura lhe confere alta taxa de absorção quando comparadas as rochas naturais. Para Kazmierczak (2007), esta influência está também relacionada com a quantidade, dimensão e distribuição dos poros presentes nos agregados, em especial os de origem cerâmica.

Segundo Bodin Buyle e Hadjieva-Zaharieva (2002) a durabilidade do concreto produzido com agregados reciclados é influenciada por algumas características destes agregados como a alta taxa de absorção de água e o aumento na relação água/cimento nos concretos experimentais, para a obtenção de uma trabalhabilidade satisfatória.

Ensaio realizados por Brito, Pereira e Correa (2005) em amostras contendo apenas agregados cerâmicos, o valor encontrado para a absorção de água foi de 12%, sendo que para os agregados convencionais este percentual foi de 1%.

Assim, para a maioria dos pesquisadores é necessário o pré-umedecimento destes agregados antes da sua aplicação (Levy, 1997; Andrade, Rocha e Cheriaf2004; Cabral, 2007).

Sem dúvida, um dos pontos cruciais na produção de concretos com agregados reciclados é a determinação da quantidade de água no pré-umedecimento (taxa de absorção). É ponto crítico e determinante avaliar o grau de influência da quantidade de substituição de AN (Agregado Natural) por AR (Agregados Reciclados) na resistência mecânica e durabilidade dos concretos

produzidos com os mesmos, pois o teor de substituição é diretamente proporcional à taxa de absorção.

A inserção de água extra na mistura, elevando a relação água/cimento, embora proporcione melhor trabalhabilidade ao concreto no estado fresco, no estado endurecido pode tornar o compósito menos resistente, mais poroso e menos durável, pois fica vulnerável a penetração de agentes agressivos do meio ambiente que podem reagir com outros elementos despassivando o concreto, causando reações de expansão indesejáveis, má aparência dentre outros que podem diminuir a vida útil da estrutura, ou causar desconforto aos usuários.

3.1.2 Massa unitária, massa específica, granulometria, forma e textura dos grãos.

Para fins de dosagem dos concretos faz necessário conhecer a massa específica, que é definida como a massa do material, incluindo os poros internos, por unidade de volume, e a massa unitária, que corresponde à massa das partículas dos agregados que ocupam por unidade de volume, uma vez que o volume é ocupado tanto pelos agregados como pelos vazios entre eles (Mehta e Monteiro, 2008).

Dessa forma, fica claro perceber que características como massa específica, a composição granulométrica, a forma e a textura superficial dos agregados afetam as propriedades dos concretos nas seguintes situações: execução da dosagem do concreto, propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido (IME, 2009).

Cabral (2007) menciona que, em geral, os agregados reciclados possuem massa específica e massa unitária menor que as dos agregados naturais, em função da quantidade de poros presentes nos agregados reciclados. Segundo o autor, este fato é decorrente de algumas características apresentadas pelos agregados reciclados como menor densidade, alta porosidade, formas irregulares das partículas. Estes resultados se confirmam com os obtidos por Leite e Dal Molin (2002) em estudos realizados com agregados reciclados de RCC na produção de concretos.

Outra característica de grande importância nos agregados é a sua composição granulométrica, visto que influencia diretamente nas misturas de concretos quanto a sua trabalhabilidade e também trazem benefícios econômicos.

Segundo o IME (2009) quanto maior o tamanho do agregado no concreto e mais elevada a proporção de partículas chatas e alongadas, maior será a tendência do filme de água se acumular próximo à superfície do agregado (podendo provocar a exsudação), enfraquecendo assim a zona de transição pasta-agregado.

Para Neville (1997), o concreto quando produzido com agregado graúdo britado, em substituição do seixo, é necessário uma quantidade pouco maior de agregado miúdo para compensar a perda da trabalhabilidade em decorrência da forma pontiaguda das partículas.

De acordo com Teychenne *et al* (1992), citado por Hansen (1992), O *Department of Environment* do Reino Unido recomenda que sejam utilizados agregados graúdos reciclados com dimensão máxima entre 16mm e 20 mm para que a durabilidade dos concretos produzidos com este agregado não seja prejudicada.

A forma e textura superficial das partículas também influenciam no comportamento do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido (Mehta e Monteiro, 2008). No caso dos agregados reciclados, devido o processo de beneficiamento, tem-se normalmente uma maior presença de partículas chatas e alongadas que podem ocasionar o surgimento de maior quantidade de vazios no concreto.

3.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS.

3.2.1 Concreto no estado fresco (Trabalhabilidade)

O controle das propriedades do concreto no estado fresco é fundamental para a sua produção de forma a assegurar características esperadas como a resistência e a durabilidade, durante a sua vida útil. No caso do emprego de agregados reciclados este controle torna-se ainda mais importante em decorrência de suas características físicas, como a porosidade.

A trabalhabilidade é definida como o esforço necessário para manter componentes como a fluidez e coesão no concreto fresco, devendo ser relacionada com o tipo de construção, durante as etapas de lançamento, adensamento e

acabamento, com perda mínima de homogeneidade (Mehta e Monteiro, 2008). No concreto produzido com agregados reciclados, esta é facilmente afetada, principalmente, se tratando de resíduo de cerâmica. Isto ocorre porque parte significativa da água da mistura é absorvida pelos agregados.

Dias e Agopyan (2004) relatam que agregados produzidos a partir de resíduos de cerâmica vermelha, como telhas e blocos, apresentam maior porosidade do sistema o que lhes confere elevada absorção e conseqüentemente menor trabalhabilidade.

Zordan (1997) também observou que nos concretos produzidos com agregados reciclados os valores da relação água/cimento foram bem maiores daqueles normalmente utilizados para confecção de concretos de referência. A explicação de tal fato se deu pela grande de água absorvida pelos agregados reciclados. Todas as amostras de concretos com agregados reciclados apresentaram variações não regulares em relação a sua consistência.

A capacidade de absorção dos agregados reciclados de RCC está relacionada à sua área superficial variando de acordo com o tipo de agregado e a forma de beneficiamento. Dessa forma, os agregados reciclados quando estão na condição seca tendem a absorver parte da água de amassamento, prejudicando a trabalhabilidade dos concretos produzidos com estes, podendo também, prejudicar a hidratação das partículas de cimento (Carrijo, 2005).

Neville (1997) relata que quando o agregado gráudo é utilizado seco, certa quantidade de água da mistura será retida em seus poros levando-o a condição saturada, assim, reduzindo a quantidade de água de amassamento. Sendo também possível que o agregado utilizado em condição seca suas partículas fiquem imediatamente cobertas de pasta de cimento, impedindo a entrada de água necessária à saturação do agregado. Este fato é significativo principalmente no caso de misturas ricas.

Estudo realizado por Leite (2001) com teores de substituição, de 0% a 100%, dos AGR e AMR, em relação aos agregados gráudos e miúdos convencionais, observou-se que quanto maior o teor de AMR maior foi o abatimento do concreto, ao contrário ocorreu quando se aumentou o percentual de AGR. Este fato pode ter sido influenciado pela quantidade razoável de finos contida nas amostras de AMR, o que contribuiu para o aumento da trabalhabilidade deste traço.

Outro fato que poderia ter influenciado na redução da trabalhabilidade das misturas foi a combinação dos dois tipos de agregados que pode ter demandado uma quantidade maior de água.

De acordo com Tu, Chen e Hwang (2006) em concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, com alta porosidade, sofre uma leve influência em relação à trabalhabilidade nas primeiras horas. Porém, se o teor de água na matriz do concreto for insuficiente para suprir a demanda da mistura levará a perda da trabalhabilidade após as primeiras horas.

Esta perda de trabalhabilidade é bem maior nas misturas com agregados reciclados (principalmente aqueles provenientes de cerâmicas), pois a água que deveria hidratar a pasta, em parte migra para o interior do RCC, e parte fica adsorvida por forças de atração nos poros da superfície do mesmo. Desta forma, a água proporcional à uma determinada trabalhabilidade que se deseja alcançar, não será suficiente para que a mesma seja alcançada.

3.3 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

3.3.1 Durabilidade e vida útil.

A NBR6118 (2007) define durabilidade como a capacidade da estrutura de resistir às situações previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural, o responsável técnico da obra e o contratante. A interação do material com o ambiente o qual ficará exposto pode com o tempo causar modificações em suas propriedades comprometendo a estabilidade e até mesmo a aparência da construção.

Para o comitê 201 do ACI (1991) a durabilidade do concreto esta relacionada com a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, mantendo-se suas características como a qualidade e capacidade de uso quando exposto ao seu meio ambiente.

O código FIP-CEB (*Comitê Euro-international du Béton*) de 1997, a durabilidade da estrutura de concreto é a capacidade de manter sua funcionalidade

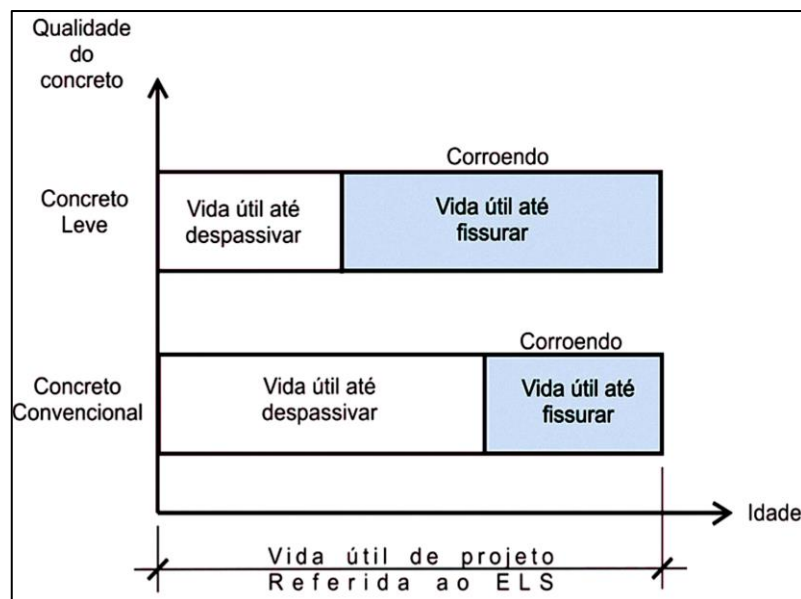
durante período de tempo desejado de acordo com a influencia dos fatores de degradação.

Além destes, outros documentos internacionais, como *fib Model Code 2010*, *ACI 365. IR 00*, *EM-206*, e análises de especialistas como Helene (1993) e Mehta (1994) é comprovada que a preocupação com a durabilidade não é de hoje, no entanto tem sido mais discutida nas ultimas décadas por conta do envelhecimento e patologias observadas em estruturas produzidas outrora que ainda não contavam com as tecnologias atuais que avançaram bastante no que diz respeito aos materiais de construção.

O conceito de vida útil do concreto, segundo a NBR 6118:2003 define:

“[...]o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.”

FIGURA 5 - VIDA ÚTIL TOTAL DE PROJETO (ELS) É A SOMA DO PERÍODO DE TEMPO ATÉ A DESPASSIVAÇÃO MAIS O PERÍODO DE TEMPO ATÉ A PRIMEIRA FISSURA SUPERFICIAL (LIVRO CONCRETO, CIENCIA E TECNOLOGIA – 2011)

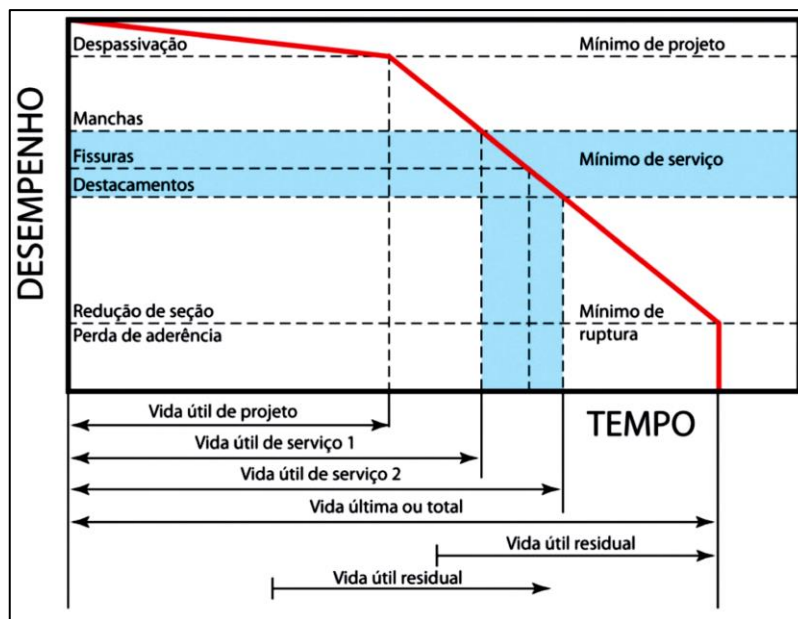


Analisando a figura 5 pode-se dizer então que o tempo de duração das estruturas de concreto depende muito da facilidade com a qual os fluidos, tanto

líquidos como gases, podem penetrar na estrutura e se deslocar no seu interior trazendo consigo agentes agressivos. Entre estes, tem-se os íons cloretos, que influenciam na corrosão das armaduras, e o CO_2 responsável pelas reações de carbonatação do concreto e a despassivação das armaduras.

Dependendo das características das peças estruturais que vão desde as tensões limites de cálculo às suas dimensões, o tempo de vida útil pode ser maior ou menor, e o surgimento de indícios como fissuras, manchas e destacamentos e corrosões são indicadores que acusam diminuição da durabilidade como se pode observar na figura 6.

FIGURA 6 - CONCEITUAÇÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO TOMANDO POR REFERÊNCIA O FENÔMENO DE CORROSÃO DE ARMADURAS (HELENE, 1997).



É prudente então sempre cuidar do desempenho, qualidade e funcionalidade das estruturas de concreto com ênfase principalmente nas condições ambientais que serão submetidas.

3.3.2 Transporte de agentes agressivos no concreto

A exposição do concreto ao ambiente deixa-o suscetível a penetração de agentes agressivos presentes na forma de fluidos que podem penetrar em sua

estrutura alterando suas propriedades e diminuindo seu desempenho com o decorrer do tempo.

O concreto, considerado um sólido poroso, está suscetível a processos físicos de degradação. Nos poros a água funciona como veículo de transporte de íons agressivos que desenvolvem processos químicos causando modificações negativas ao bom funcionamento do concreto. O mecanismo de transporte é dependente do fluxo de substâncias e suas concentrações, as condições ambientais e características de porosidade do concreto.

Dentre os principais mecanismos de transporte de massa no concreto pode-se citar como mais importantes a permeabilidade, a difusão, absorção capilar e a migração. Para Helene (1993) o início da corrosão de se dá com a absorção por capilaridade seguida de processos de difusão e permeabilidade, vindo depois a migração dando início ao processo corrosivo através da movimentação de íons. Neville (1997) avalia a permeabilidade como sinônimo de movimento global de fluidos no concreto.

As literaturas a respeito do assunto são unânimes ao considerar a água como agente fundamental em todos os estados e situações que se avalia o concreto.

“(...) a água, que é agente fundamental tanto na criação quanto da destruição de muitos materiais naturais, costuma ser o fator central para a maioria dos problemas da durabilidade no concreto.”(Mehta & Monteiro, 2008)

A água está presente em todas as fases do concreto, desde a mistura ao período de vida útil quando exposto aos diversos ambientes. No momento da mistura a água utilizada tem a função de hidratar o cimento além de prover trabalhabilidade ao concreto. A porcentagem de água destinada a este último não reage e tende a sair do concreto (processo de exudação) formando uma rede de poros que embora as vezes não seja aparente, irá caracterizar o concreto como material poroso (Mehta & Monteiro, 2008).

Pode-se então concluir que a relação água/cimento e o grau de hidratação do concreto são características culminantes e essenciais para dar-se início a uma

avaliação da disposição e características dos poros do concreto e consequentemente da sua durabilidade.

Diversos autores têm procurado entender melhor estes fenômenos através de ensaios já normatizados ou adaptados. A capacidade ou risco de ocorrência de um determinado mecanismo tem sido avaliada através da observação de potenciais elétricos. A ação do gás carbônico junto ao oxigênio e umidade como processo essencial para que ocorra o fenômeno de corrosão, tem sido feita de diversas maneiras, mas com resultados não muito divergentes.

Baseado nestes fundamentos bibliográficos julgou-se relevante abordar conceitos e o funcionamento de alguns mecanismos que são considerados essenciais para o entendimento da durabilidade, válido tanto para concretos convencionais como para aqueles compostos por agregados reciclados.

3.3.2.1 Permeabilidade

A permeabilidade tem como definição a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido (Mehta & Monteiro, 2008)

Ao citar a permeabilidade consequentemente falamos de durabilidade. Os mecanismos de transporte de fluidos como água, gás carbônico e oxigênio são os principais causadores de patologias no concreto e diretamente ligados a capacidade de penetração nos poros.

O volume, a quantidade e as dimensões das imperfeições e poros contidos no concreto no estado endurecido são provenientes principalmente pelos fenômenos de retração, exudação e expansão que podem ocorrer na matriz cimentícia, afetando diretamente na permeabilidade e resistência do concreto.

Zakaria e Cabrera (1996) comentam a respeito de concretos produzidos com agregados de cerâmica vermelha que apresentam porosidade maior que 50% em relação a concretos convencionais.

Concretos produzidos com agregados reciclados são geralmente caracterizados por uma maior tendência a absorção de água. Como já citado no item 3.1.1, os agregados reciclados tem elevadas porosidade e consequentemente elevada taxa de absorção, estas características são transmitidas para o concreto à medida que se faz a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado.

Assim espera-se que em concretos produzidos com RCC a quantidade de poros seja elevada e que o mesmo tenha alta permeabilidade.

É importante neste contexto entender bem a diferença entre permeabilidade e porosidade. Embora sejam características interligadas no concreto, a porosidade é o volume de poros existente, já a permeabilidade é a característica que depende de como este de volume de poros está disposto no concreto, bem como suas dimensões e conexões.

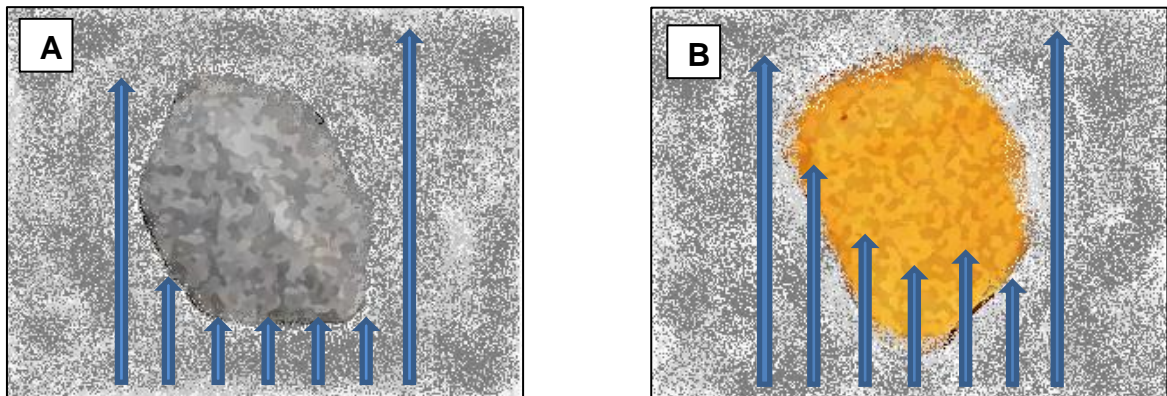
3.3.2.2 Absorção por capilaridade

Nos concretos, a penetrabilidade de fluidos está diretamente ligada à distribuição dos poros bem como a sua interligação na microestrutura da pasta cimentícia. O teor de água (relação água/cimento), quanto maior, tende a desenvolver canais verticais durante o período de hidratação inicial (primeiras horas), que não serão preenchidos por completo pelos produtos da hidratação. (POWERS *et al.*, 1954)

Relações água/cimento maiores provocam maior exsudação, por consequência ocorrem deslocamentos entre pasta e agregados originando um maior índice de vazios nestas regiões. (COUTINHO, 1997)

A influência do agregado gráúdo na capilaridade do concreto pode ser maior ou menor dependendo da porosidade do material que o compõe, forma e do diâmetro que apresenta e da qualidade da pasta cimentícia que envolverá o agregado reciclado. Agregados gráudos mais porosos trabalham como pontes que facilitam a percolação de água, já os menos porosos dificultam os mecanismos de transporte atuando como barreiras espalhadas pela pasta. (BUENFELD E OKONDI, 1998)

FIGURA 7 - (A) AGREGADO ATUANDO COMO “BARREIRA” DIFICULTANDO A PASSAGEM DE ÁGUA. (B) AGREGADO DE MAIOR POROSIDADE COMPORTANDO-SE COMO EXTENSÃO DOS VASOS CAPILARES.



Como se observa na figura 7, a absorção de água por capilaridade é análoga nos concretos produzidos com agregados naturais e reciclados provenientes de RCC. Entretanto os concretos com agregados reciclados tendem a absorver mais água em proporção direta à capacidade de absorção característica do tipo de RCC que se utiliza.

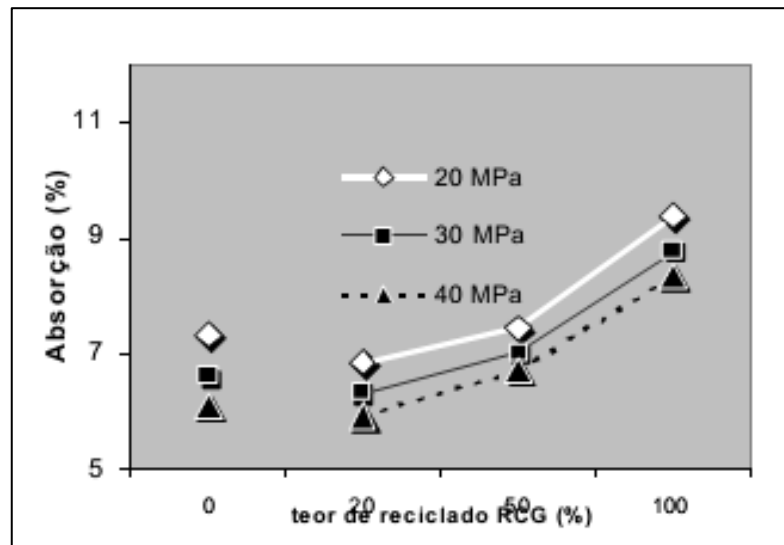
Segundo Mansur *et al* (1999), a taxa de absorção de agregados reciclados de blocos cerâmicos influencia na durabilidade dos concretos devido esta capacidade ser responsável pela grande movimentação de água nas misturas dos concretos.

Segundo estudo feito por Barra (1996), agregados reciclados de concreto tem capacidade de absorção de até 7,49%, enquanto aqueles provenientes de material cerâmico possam chegar a 14,5%.

Em estudo realizado por Wirquin (2000), foi observado que mesmo com o avanço das idades, os concretos tanto com AGR quanto com AGN ainda continuam absorvendo água mesmo em menores quantidades proporcionalmente ao tipo e porcentagem de agregado utilizado.

Na figura 8, dados obtidos por LEVY e HELENE (2000), constataram que agregados graúdos provenientes de alvenaria cerâmica produzem concretos com maior índice de absorção, sendo este ainda maior quanto maior for também a porcentagem de substituição do agregado natural pelo reciclado.

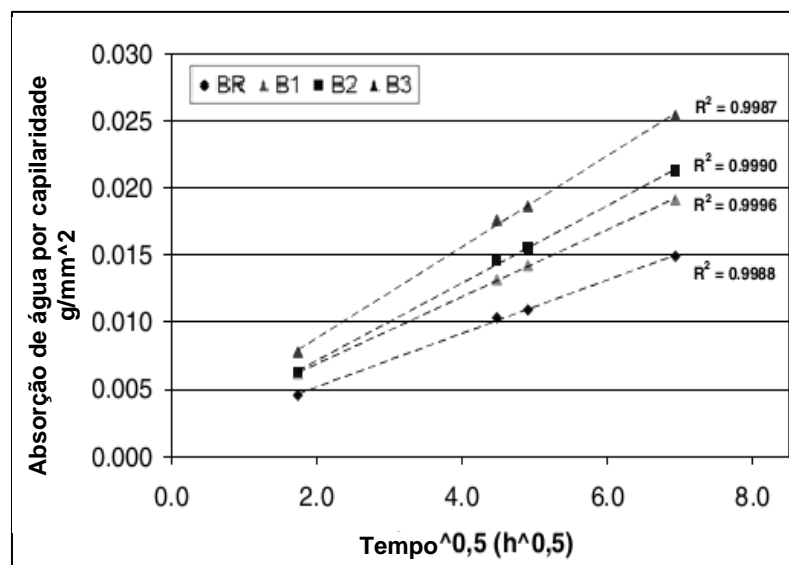
FIGURA 8 - VARIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA CLASSE DO CONCRETO E DO TEOR DE MATERIAL RECICLADO (LEVY, 2000)

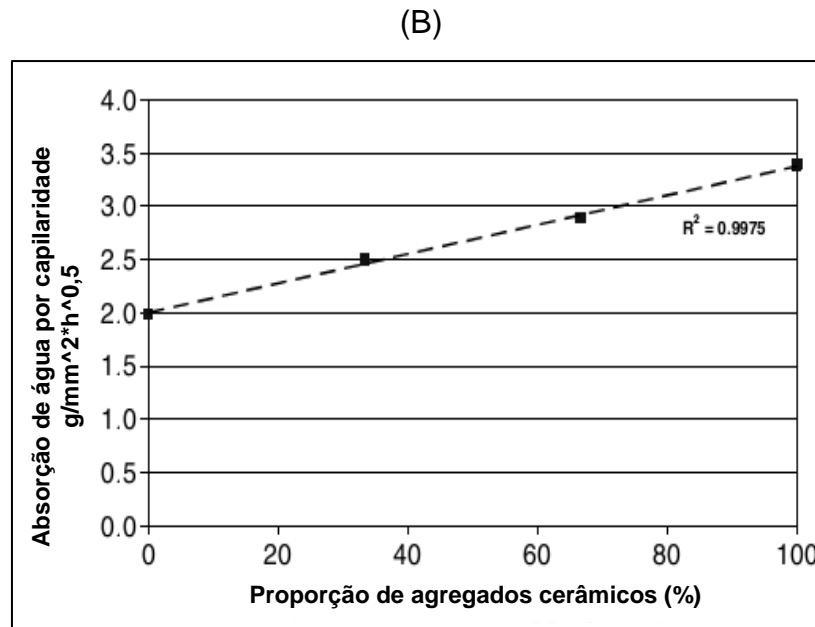


Correia, Brito e Pereira (2006) concluíram que o principal problema ao se substituir agregados naturais por cerâmicos reciclados na produção de concretos é o alto índice de absorção adquirido que pode diminuir notavelmente a durabilidade do compósito, sendo maior quanto maior for a porcentagem de agregados cerâmicos utilizado (figura 9).

FIGURA 9 - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (A) E PORCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO NATURAL PELO AGREGADO PROVENIENTE DE RESÍDUOS CERÂMICOS (B) (CORREIA, BRITO E PEREIRA – 2006)

(A)





3.3.2.3 Difusão e migração

A difusão segundo Silva Filho (1994) é o mecanismo através do qual um determinado fluido se desloca em função de uma diferença de potencial químico. A diferença de concentração e o fluxo de substâncias tende ao equilíbrio do sistema. Segundo Lin (1990) quanto maior forem as diferenças de concentração, maior será a intensidade do mecanismo.

No concreto o mecanismo de difusão pode envolver desde gases à ions de caráter agressivo. Os gases mais relevantes que se estuda a difusão são o oxigênio e o gás carbônico em face ao fenômeno de carbonatação e corrosão das armaduras (NEVILLE, 1997). Dentre os íons de caráter agressivo destaca-se os cloretos que se movimentam nos poros do concreto difundidos na água presente.

Para que o processo de difusão ocorra no concreto, seus poros devem estar com uma mínima porcentagem de umidade que permita a difusão dos íons. No caso de poros saturados a difusão tem sua maior intensidade, sendo ela diminuída conforme diminui-se o grau de saturação do concreto. (NEVILLE, 1997)

O mecanismo da migração, diferente da difusão, é dependente da existência de um campo elétrico que movimentará as cargas elétricas a partir da presença de íons. No concreto as maiores possibilidades para que um campo elétrico seja

gerado, é através de processos de corrosão eletroquímica ou através de uma diferença de potencial gerada por um elemento externo (HELENE, 1993).

3.3.2.4 Avaliação de mecanismos combinados

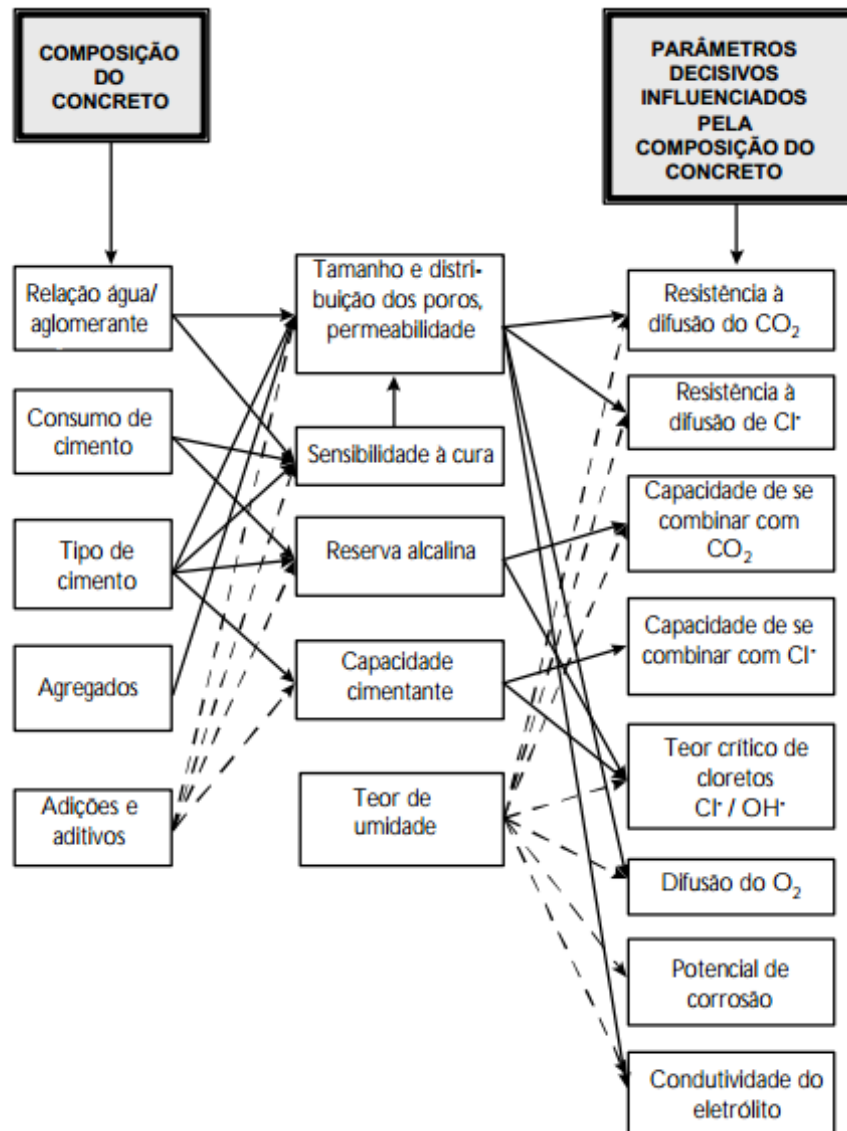
3.3.2.4.1 Resistividade elétrica

A capacidade de um condutor de volume e seção constantes, resistir à passagem de correntes elétricas uniformes e contínuas é denominada resistividade elétrica (ESBACH, 1975, *apud* WHITING & NAGI, 2003).

Esta propriedade também pode ser observada em concretos e relacionada diretamente à porosidade, permeabilidade e a capacidade de difusão de íons Na^+ , K^+ , Ca^{++} , OH^- e Cl^- na solução dos poros do material (HANSSON, 1993). Conseqüentemente a velocidade ou risco do início do processo de corrosão das armaduras de aço também.

O esquema da figura 10 (ABREU, 1998), apresenta fatores e processos responsáveis para que ocorra a corrosão de armaduras.

FIGURA 10 - FATORES E PROCESSOS RESPONSÁVEIS PARA QUE OCORRA A CORROSÃO DE ARMADURAS (ABREU, 1998)



A resistividade no concreto pode ser expressa de forma diferente a dependendo da região a qual está sendo avaliada. Quando se leva em consideração a região do cobrimento das armaduras a resistividade avaliada é denominada “aparente”. Medidas mais internas no concreto, em regiões de umidade mais estável, a resistividade avaliada denomina-se volumétrica.

Em geral o risco de corrosão das armaduras é uma das principais preocupações para evitar a deterioração e diminuição da vida útil das estruturas de concreto. Em função disto, Helene (1993) afirmou um maior interesse na medida de resistividade elétrica aparente.

Os critérios de avaliação do risco de corrosão foram propostos pelo CEB 192 (1988) como consta na tabela 5.

TABELA 5 - CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO RISCO DE CORROSÃO FORAM PROPOSTOS PELO CEB 192 (1988)

Resistividade do concreto	Probabilidade de corrosão
> 20000 ohm.cm	Desprezível
10000 a 20000 ohm.cm	Baixa
5000 a 10000 ohm.cm	Alta
< 5000 ohm.cm	Muito alta

Medidas de resistividade elétrica são feitas através da aplicação de uma diferença de potencial em dois pontos ou eletrodos e medida a corrente resultante. Através deste procedimento obtém-se a corrente “i”, a tensão aplicada “V” e relacionando-se as duas obtém-se a resistência “R”. A resistividade “ ρ ” é calculada a partir da multiplicação de “R” pelo fator de conversão relacionado às dimensões do corpo de prova utilizado.

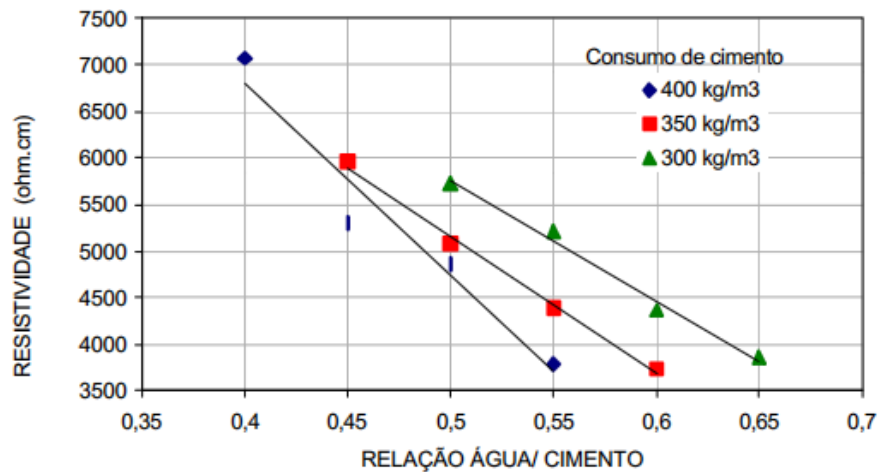
No entanto, para o concreto, esta medida pode sofrer alterações devidas algumas características químicas, porosidade e da microestrutura do mesmo (POLDER, 2001; WHITING & NAGI, 2003).

Helene (1996) afirma que a relação água/cimento é fator fundamental e decisivo nas características físicas como permeabilidade e porosidade do concreto. Nepomuceno (2005), também afirmou que aumento da relação a/c aumenta a conectividade dos poros do na microestrutura do concreto.

Bakker (1998) constatou em sua pesquisa que qualidade do potencial resistivo do concreto também depende principalmente da quantidade de água utilizada na mistura bem como o tipo de cimento.

Em estudo feito por Hughes *et. al*/1985 apud Whiting & Nagi, 2003, avaliando o comportamento de concretos utilizando cimento Portland comum (figura 11), mostra que a relação água/cimento quando elevada, aumenta diretamente a quantidade e a estrutura de poros da pasta cimentícia. Quanto maior for à disposição dos poros, volumes bem como o diâmetro destes pode haver uma redução da resistividade nos concretos facilitando a difusão de íons.

FIGURA 11 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO FATOR ÁGUA/CIMENTO E CONSUMO DE CIMENTO - HUGHES ET. AL1985 APUD WHITING & NAGI, 2003 (1985)



A umidade também deve ser considerada quando avaliadas medidas de resistividade no concreto. Polder (2001) observou que alterações bem acentuadas podem ocorrer dependendo das condições de saturação dos corpos de prova analisados, os mesmos podendo apresentar valores de resistividade de $10 \Omega \cdot m$ à $10^5 \Omega \cdot m$.

O grau de saturação dos poros é proporcional a umidade relativa a qual o concreto está submetido. A saturação de poros diminui a resistividade dos concretos e conseqüentemente uma provável, mas não certa corrosão das barras de aço.

Fica evidente que água atua sempre como um elemento responsável pela diminuição da resistividade, o incremento do fator água/cimento no momento da dosagem ou a exposição do elemento de concreto a ambientes saturados ou de elevada umidade podem, dependendo das propriedades do concreto, constituir situações de risco elevado de corrosão.

Além do fator água/cimento, os agregados graúdos também possuem sua parcela de intervenção dos valores de resistividade elétrica dos concretos. Os agregados graúdos atuam como barreiras não condutoras com resistividade de até $880.000 \Omega \cdot cm$. O efeito da obstrução atua como um extensor do caminho que a corrente percorre pelo concreto, concluindo-se então que o aumento no volume de agregados é um fator interveniente no aumento da resistividade do concreto (MONFORE, 1968).

É importante ressaltar que advento da utilização de agregados reciclados, nos coloca em alguns casos, uma probabilidade de encontrar situações contrárias às citadas acima. Embora sejam feitas substituições em mesmo volume, ensaios de resistividade feitos concretos saturados compostos por agregados de elevada porosidade podem ter maiores quedas no valor da resistividade.

3.3.2.4.2 Carbonatação

O fenômeno da carbonatação em concretos esta ligado diretamente com o processo de corrosão das armaduras. Mehta (2008) afirmou que a corrosão, é um fenômeno que causa bastante preocupação devido sua incidência dificuldade de reparos em estruturas em estado de corrosão.

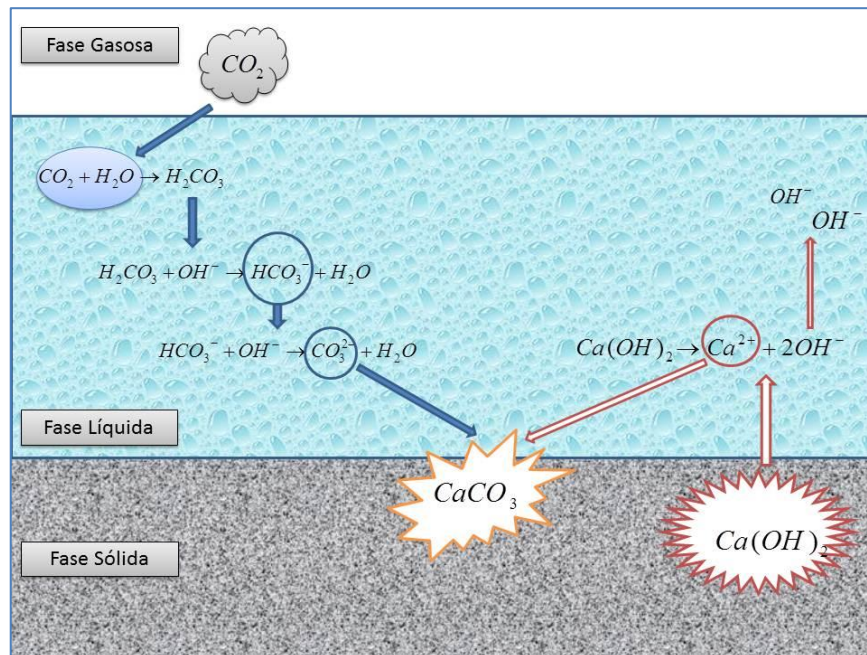
Para que seja possível o entendimento da ligação entre carbonatação e corrosão, é necessário que os processos que decorrem durante o fenômeno patológico fiquem bem claros tanto a nível físico como químico.

Os fluidos e gases presentes no meio ambiente reagem com os produtos alcalinos provenientes da hidratação do cimento presente no concreto tendendo a baixar o ph das estruturas. A principal reação da carbonatação ocorre entre o gás carbônico e o hidróxido de cálcio como se pode observar na Equação 1:

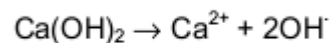


Embora a reação da Equação 1 seja a mais importante no processo de carbonatação, é relevante entender o porque da queda do ph e a qual a influência das fases gasosas, sólidas e líquidas observadas na figura 12.

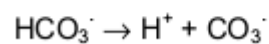
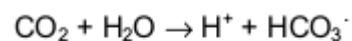
FIGURA 12 - REAÇÃO DE CARBONATAÇÃO, FASES E COMPOSTOS (ADAPTADO DE PAULETTI (2009) BASEADA EM THIÉRY (2005)).



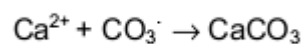
O processo ocorre inicialmente a partir da dissolução do hidróxido de cálcio na água presente nos poros do concreto:



O gás carbônico se difunde nos poros e dissolve-se na solução aquosa:



O hidróxido de cálcio e o gás carbônico reagem em solução aquosa, formando carbonatos:



O mecanismo da carbonatação ocorre essencialmente através da difusão de CO_2 e dissolução na água presente nos poros (Pauletti, *et al* 2009). Fato que exige a presença de água ou umidade para que a reação ocorra. Durante a presença do CO_2 em solução aquosa a concentração de íons OH tende a diminuir o que ocasiona também uma diminuição no pH desta região de poros.

Esta diferença de pH divide a área de avanço da carbonatação em 3: Região carbonatada com pH abaixo de 9; região em fase de carbonatação; e a região não carbonatada com pH acima de 12. (Kulakowski, 2002).

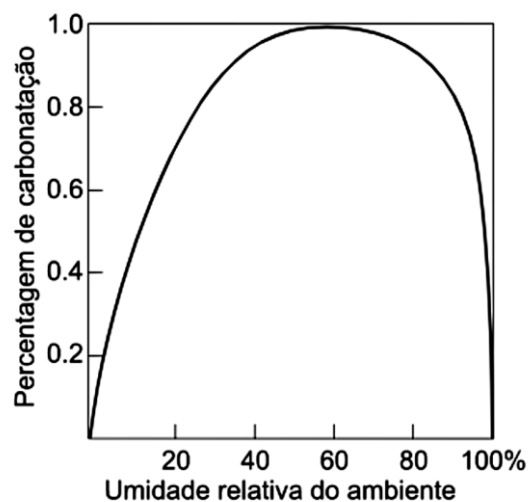
É consenso entre todos os estudos já feitos que o fenômeno da carbonatação tem sua ocorrência ligada a características do ambiente de exposição, e que as mesmas podem acelerar ou retardar o processo.

Papadakis (*et al.* 1991) coloca em suas observações que em poros saturados a difusão de CO_2 é desprezível, assim como nos poros com umidade inferior à 50% não há eletrólitos suficientes para que haja reação.

Andrade (2005), afirmou que em umidades relativas superiores a 80% os poros saturados de água dificultam que o gás CO_2 penetre até as proximidades de armadura, e em umidades inferiores a 50% processo de carbonatação não ocorreu.

Bary e Sellier (2004) afirmam que a velocidade carbonatação é maior em umidade entre 40% e 80%. Helene (1993) observou que as velocidades eram maiores quando a umidade foi registrada entre 60% e 85%. Venuat (1977 apud ROSEMBERG *et al.* 1989) concluiu em suas pesquisas que a maior porcentagem de carbonatação ocorre em umidade entre 50% e 70% (figura 13).

FIGURA 13 - GRAU DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE VENUAT (1977 APUD ROSEMBERG *ET AL.* 1989)



Conclui-se que é de grande importância então avaliar a umidade do ambiente ao qual esta exposta a estrutura de concreto analisada para questões de comparação ou estimativas de carbonatação.

Quanto à temperatura, sua ação esta ligada a catalisação das reações de carbonatação, sendo esta uma grandeza diretamente proporcional à velocidade de difusão dos íons em solução.

Barra (1996) verificou que a resistência à carbonatação de concretos reciclados sofre uma influência muito grande da porosidade da matriz da nova mistura junto a matriz antiga de agregados reciclados de concreto. Também em seus estudos, verificou o comportamento de concretos produzidos com 10, 20 e 40 % de substituição de grãos naturais por agregados reciclados provenientes de material cerâmico, onde concluiu que nos ciclos de gelo/degelo, as condições de saturação pioram as propriedades do concreto devido a um enfraquecimento na zona de transição que não suporta as tensões existentes nessa região do concreto.

Kikuchi et al. (1998), observou que concretos com RCC, submetidos à carbonatação de 5%, ao se utilizar agregados miúdos reciclados, observou-se maior frente de carbonatação do que quando utilizados apenas agregados grãos reciclados. Fato que pode ser explicado a partir da análise da superfície específica de AGR e AMR, a qual é bem maior nos AMR, o que remete a uma maior demanda de água para suprir o nível de absorção dos mesmos, aumentando assim a probabilidade do surgimento de poros e assim aumentando a permeabilidade do concreto.

Quando se fala em agregados reciclados com alto índice de poros, deve-se levar em consideração que o consumo de água extra devido à taxa de absorção, tende a elevar o fator a/c enfraquecendo a pasta cimentícia com alto índice de poros com maior dimensão e permeáveis. Logo, mesmo com toda a heterogeneidade peculiar dos RCC, deve-se tentar limitar o diâmetro máximo dos agregados grãos reciclados, de forma que os mesmos tenham o mínimo de influência negativa nas propriedades mecânicas e de durabilidade.

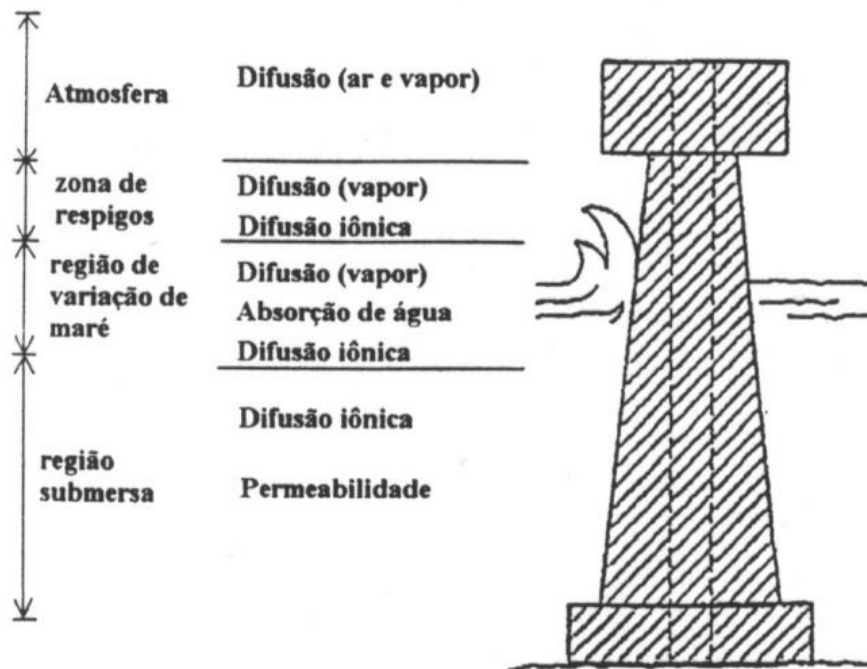
3.3.2.4.3 Penetração de íons cloretos

A penetração de íons cloretos pode envolver todos os mecanismos de transporte de massa no concreto combinados com as características do ambiente ao qual a estrutura esta submetida. (HELENE, 1993)

A penetração de íons cloretos ocorre somente na presença de água, segundo Guimarães (1997) a difusão e a permeabilidade só ocorrem em estruturas saturadas isentas de forças capilares. Já no caso de poros submetidos a ciclos de contato com água contendo íons cloretos o processo de penetração ocorre por sucção capilar, e a profundidade atingida será diretamente a duração dos ciclos e porosidade e permeabilidade da camada superficial do concreto (BAKKER, 1998).

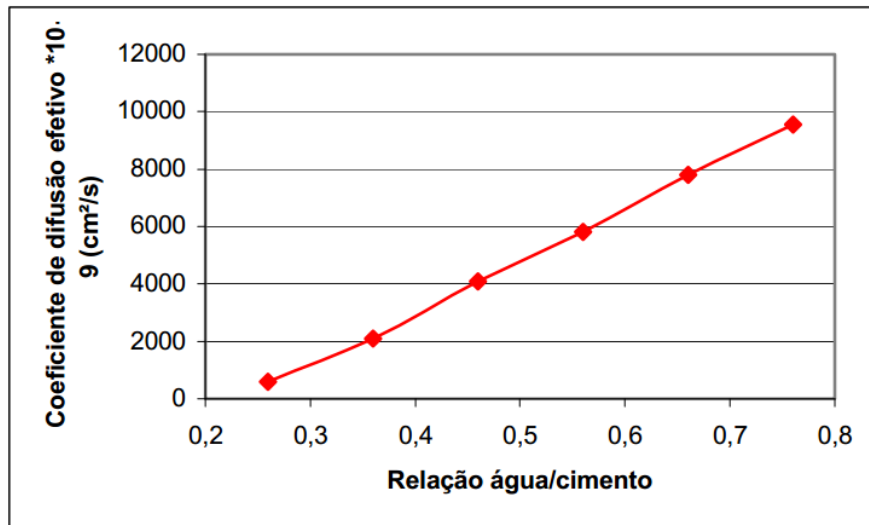
O mecanismo de transporte de íons é então diferente e para cada tipo de exposição do concreto como ilustra o esquema da figura 14.

FIGURA 14 - MECANISMOS DE TRANSPORTE EM ESTRUTURAS MARITIMAS (CONCRETE SOCIETY WORKING PARTY APUD PERRATON *ET AL.*, 1992)



A relação água/cimento é o fator de maior influência na resistência a penetração de cloretos em concretos. Segundo Hoffman e Dal Molin (2002), quanto menor a relação água/cimento, mais dificuldade os íons cloreto terão para penetrar no concreto. Pereira (2002) constatou o mesmo (figura 15) ao julgar a influencia do tamanho e interconectividade dos poros.

FIGURA 15 - COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS X RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO – (PEREIRA, 2002)



No entanto a utilização de agregados reciclados tende a influenciar no aumento da penetração de íons no concreto para concretos com mesmo fator água/cimento dos de referência. Quanto maior a porcentagem de substituição de agregados grãos naturais por reciclados, Levy (2001) observou que havia também um incremento no teor de íons cloretos.

Ryu (2002) e Tu *et al.*(2006) encontraram maiores valores de penetração de cloretos em concretos com agregados reciclados em comparação com concretos referencia convencionais. Os mesmos autores também observaram que ao elevar o fator água/cimento a situação citada anteriormente ficava ainda mais evidente.

Estudos realizados por Olorungoso e Padaychee (2002) analisando a durabilidade de concretos encontraram sempre menores desempenhos das propriedades de durabilidade em concretos; obtiveram dados de aumento de mais de 70% na condutividade de cloretos em concretos com RCC comparados à misturas convencionais.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De forma a atingir os objetivos desta pesquisa fez-se necessário a realização de um programa experimental o qual serviu como parâmetro técnico ao desenvolvimento de todos os procedimentos, a fim de avaliar do comportamento relacionado à trabalhabilidade, resistência à compressão e durabilidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha. A metodologia seguiu as seguintes etapas:

- Planejamento dos ensaios
- Aquisição e caracterização dos materiais
- Dosagens dos concretos
- Ensaios de Laboratório

O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará – UFPA, na cidade de Belém - PA.

4.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Como parâmetro para avaliar as misturas experimentais definiu-se algumas variáveis de respostas, as quais são:

- Trabalhabilidade

Levou-se em consideração que a utilização dos agregados cerâmicos certamente provocaria modificações no abatimento que necessariamente foi observada e levada em consideração nas análises de resultados. Utilizou-se para avaliação da trabalhabilidade o ensaio de tronco de cone. A escolha do abatimento de 8 ± 2 cm foi definida para que fosse seguido um padrão a ser alcançado em todas as misturas.

- Resistência à compressão simples;
- Absorção de água por capilaridade;
- Penetração acelerada de íons Cloretos;
- Carbonatação acelerada do concreto;
- Resistividade elétrica.

De acordo com as variáveis de respostas foram definidas as variáveis de controle, as quais foram fixadas e mantidas durante todo o programa experimental a fim de verificar a sua influência em função do teor de agregados e taxa de compensação de água para cada ensaio. Estas são:

- Teor de substituição: foram adotados os teores de 0% e 50% de substituição em volume dos agregados graúdos convencionais (AGN) pelos agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha (AGRC).
- Taxas de compensação: as taxas de compensação da absorção de água dos agregados reciclados foram de 60%, 80% e 100%, por misturas e por traços.
- As relações água/cimento utilizadas foram de 0,35, 0,50 e 0,65. Tais valores foram escolhidos pelo fato dos mesmos cobrirem as faixas de resistências normalmente empregadas na região metropolitana de Belém.

4.2 AQUISIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

➤ Cimento Portland

O cimento utilizado foi tipo CP-II F 32 (Cimento Portland Composto Classe 32) especificado pela NBR 11578. A escolha para utilização deste tipo de cimento deve-se a necessidade de evitar qualquer interferência de algum efeito pozolânico que poderia surgir.

➤ Agregado Miúdo

A areia de leito de rio (figura 16) foi proveniente de regiões próximas à cidade de Belém, onde foram realizados ensaios de composição granulométrica, massa específica, massa unitária, módulo de finura e dimensão máxima (tabela 6), regidos pelas normas: NBR 248 (ABNT, 2003), NBR NM 52 (ABNT, 2003), NM 45 (ABNT, 2002).

FIGURA 16 - AGREGADO MIÚDO UTILIZADO NAS MISTURAS



TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MIÚDO

Agregado Miúdo				
Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida acumulada	Método de ensaio (NBR)
4.8	4,12	0,4	0	NBR NM 248 (2003)
2.4	8,32	0,8	1	
1.2	34,44	3,4	5	
0.6	173,95	17,4	22	
0.3	535,69	53,6	76	
0.15	221,53	22,2	98	
<0.15	21,95	2,2	100	
	1000	100	-	
Massa Específica		2,63 Kg/dm ³		NBR NM 52 (2009)
Massa Unitária		1,44 Kg/dm ³		NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura		2,02 mm		NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		1,20 mm		NBR NM 248 (2003)
Índice de Vazios (%)		45,25		NBR NM 45 (2006)

É importante ressaltar a elevada finura da areia utilizada nesta dissertação, característica relevante e comum nas regiões dentro do estado do Pará e usualmente presente nos canteiros de obra situados na região metropolitana de Belém.

➤ Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita proveniente de granito (figura 17) da região de Traquateua (interior do estado do Pará) na qual foram realizados ensaios de composição granulométrica, massa específica, massa unitária, módulo de finura e dimensão máxima (tabela 7), regidos pelas normas: NBR 248 (ABNT, 2003), NBR NM 53 (ABNT, 2003), NM 45 (ABNT, 2002).

FIGURA 17 - AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO NAS MISTURAS



TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO

Agregado Graúdo Natural				
Peneiras (mm)	Massa Retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada	Método de ensaio (NBR)
38	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
25	0	0	0	
19	3,5	35	35	
12,5	4,36	44	79	
9,5	0,44	4	83	
4,8	0,48	5	88	
Fundo	1,22	12	100	
	10	100	-	
Massa Específica		2,59		ABNT NBR NM 53 (2009)
Massa Unitária		1,56		ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura		3,85		ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		25 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de Vazios (%)		39,77		NBR NM 45 (2006)

➤ Agregados Reciclados

Os materiais reciclados utilizados como agregados na produção das misturas experimentais foram compostos por cacos de telhas e tijolos. Este material foi obtido diretamente das próprias indústrias visando diminuir a sua contaminação.

Contudo, para o seu emprego como agregado no concreto, fez-se necessária a realização de um processo de beneficiamento destes materiais, constituídos basicamente de britagem e peneiramento. Após este processo foi realizado a caracterização do material obtido. Na utilização dos resíduos de cerâmica vermelha como agregado reciclado foi necessário a realização do seu beneficiamento seguindo alguns procedimentos para adequá-lo a granulometria requerida à confecção dos concretos.

É interessante ressaltar que, para este trabalho e em trabalhos anteriores desta mesma instituição, inicialmente a britagem dos RCC era feita em britador de mandíbula. Por ser um processo adaptado, não havia controle nem da forma nem do diâmetro máximo do agregado produzido, que após o processo mecânico necessitava de um segundo momento onde havia a quebra manual e peneiramento que tornava o processo inviável.

Partiu-se então para uma tentativa de “quebra” por abrasão, na qual os tijolos eram quebrados em partes um pouco menores para que pudessem adentrar no aparelho de abrasão (figura 18.a), e logo após foram submetidos a sequencias de tempo de 5, 10, 20 e 30 minutos, e então avaliadas as propriedades do material obtido. No tempo de 30 minutos, observou-se que todo o material depositado tornava-se passante 50% abaixo da peneira 4,8mm e os outros 50% tinham diâmetro máximo de 19mm. Além disso, a forma dos AGR obtidos foi satisfatória como se pode observar na figura 18.b, pois se notou uma superfície mais boleada e bem acabada além de uma maior uniformidade dos mesmos.

FIGURA 18 - MAQUINÁRIO DE ABRASÃO (1) E FORMA DOS AGREGADOS APÓS O PROCESSO DE BRITAGEM POR ABRASÃO (2).



Apos o processo de britagem, partiu-se para a etapa de peneiramento, figura 19. Nesta etapa, tem-se como objetivo a produção de um material com as características semelhantes ao material natural a ser substituído. No peneiramento serão adotadas as faixas granulométricas conforme NM 248 (ABNT, 2002). Nesta etapa também foi realizada a separação do que era considerado agregado graúdo e miúdo.

FIGURA 19 - PENEIRAMENTO DO AGREGADO GRAÚDO RECLICADO (AGR)



Os ensaios de caracterização granulométrica (tabela 8) destes materiais seguiram os mesmos procedimentos das normas utilizadas para os agregados convencionais com algumas modificações pertinentes quanto ao método de avaliação da absorção de água.

TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO

Agregado Graúdo Reciclado				
Peneiras (mm)	Massa Retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada	Método de ensaio (NBR)
38	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
25	0	0	0	
19	0,02	2	2	
12,5	0,517	51,7	54	
9,5	0,234	23,4	77	
4,8	0,116	11,6	89	
Fundo	0,074	7,4	96	
	10	100	-	
Massa Específica		2,41		ABNT NBR NM 53 (2009)
Massa Unitária		1,55		ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura		3,18		ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		19 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de Vazios (%)		35,68		NBR NM 45 (2006)

A compensação da água absorvida pelos agregados graúdos reciclados durante o processo de mistura dos concretos experimentais ocorreu por meio da saturação destes agregados antes da produção do concreto.

O procedimento adotado para a determinação da absorção de água do agregado reciclado seguiu o método proposto por Leite (2001) modificado. Dessa forma, os AGRC foram secos em estufa e colocados no recipiente no qual a tampa e o fundo são revestidos com uma malha de 0,044 mm de abertura. Em seguida foram submersos em água, a partir deste instante foi monitorado o ganho de massa do material submerso com o auxílio de uma balança dotada de um dispositivo para medida hidrostática da massa com precisão de 0,01 g. Antes de cada leitura, o recipiente foi agitado cuidadosamente para facilitar a saída do ar presente na amostra.

Este monitoramento do ganho de massa do material ocorreu ao longo de 24 horas, sendo que nos 10 primeiros minutos foi feita uma leitura a cada minuto; entre 10 e 30 minutos uma leitura a cada 5 minutos; após isso, entre 30 minutos e 1 hora uma leitura a cada 10 minutos; entre 1 e 2 horas, uma leitura a cada 15 minutos; a

partir das 2 horas, uma leitura a cada hora até que se completassem 9 horas depois do instante inicial. E por último, realizou-se uma leitura após 24 horas da colocação da amostra em água.

Dessa forma, foi obtida uma curva de absorção em ganho de massa o material em função do tempo (gráfico 1), com isso, foi possível determinar a quantidade de água a ser compensada na mistura e o tempo para a realização da pré-saturação (figura 21).

GRÁFICO 1 - GRÁFICO DE ABSORÇÃO DO AGRC EM FUNÇÃO DA RAIZ DO TEMPO EM MINUTOS OBTIDO ATRAVÉS DO MÉTODO LEITE MODIFICADO (2001).

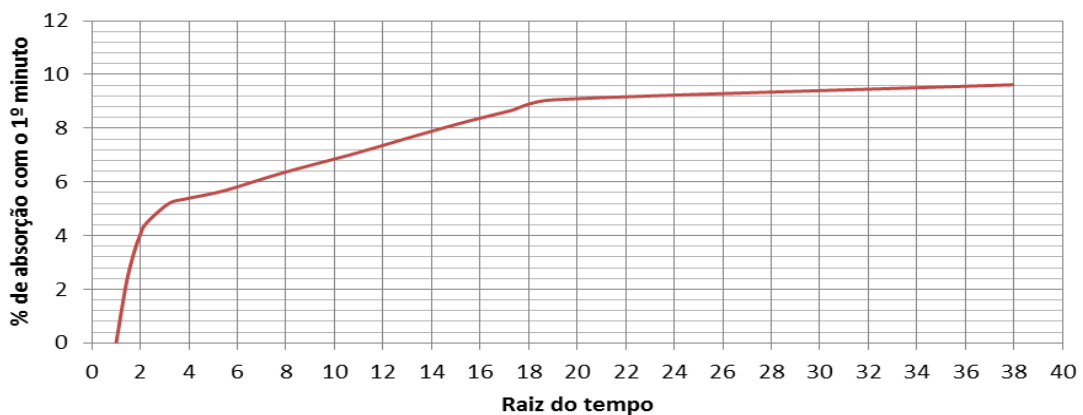


FIGURA 20 - AGREGADO CERÂMICO EM PROCESSO DE 100% SATURAÇÃO



4.2.1 Dosagem dos concretos.

A dosagem utilizada nas misturas dos concretos experimentais foi baseada no método desenvolvido pelo IPT/USP (Helene e Terzian,1993). Neste método foi determinado um teor de argamassa 52% obtido a partir da avaliação do traço

intermediário de 1:5 em massa. Para uniformizar a trabalhabilidade dos concretos, o abatimento foi fixado em 80 ± 20 mm. A partir do traço intermediário foram elaborados um traço “rico” de 1:3,5 e um pobre de 1:6,5 que seguiram os mesmos parâmetros de trabalhabilidade do intermediário (1:5). A partir dos dados dos três traços foram formuladas curvas de correlação entre os materiais secos “ms” (agregados graúdos e miúdos) , relação água cimento “a/c” e o consumo de cimento “C” representados no gráfico 2.

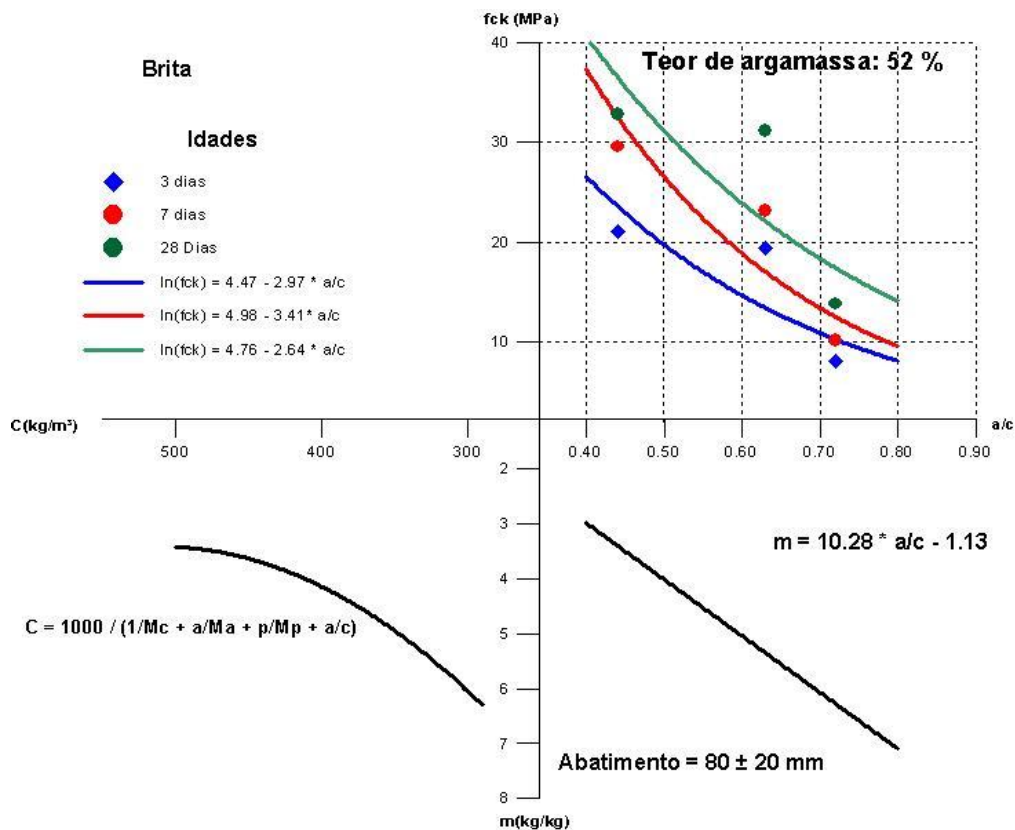


GRÁFICO 2 - GRÁFICO REFERÊNCIA DE DOSAGEM IPT/USP

A partir dos dados do gráfico de dosagem, compôs-se os traços referência buscando as 3 relações água/cimento já predefinidas no item 4.1. A tabela 9 contém as quantidades de materiais em quilo, para concretagem dos corpos de prova para cada ensaio.

TABELA 9 - QUANTIDADE DE MATERIAL UTILIZADO POR TRAÇO

Cimento	Areia	Brita	a/c	Consumo de cimento/m ³
1	1,34	2,16	0,45	471,26
1	1,87	2,65	0,55	382,30
1	2,41	3,14	0,65	321,59

É importante ressaltar que devido à diferença de massas específicas entre os agregados graúdos naturais (brita) e reciclados (cerâmica), foi necessário um ajuste baseado no volume e massa dos materiais. A substituição exata na mesma quantidade em quilos aumentaria o volume em função dos agregados cerâmicos em relação ao traço referência não havendo assim equivalência entre os traços e conseqüentemente resultaria em alterações no teor de argamassa.

Foi seguida neste trabalho mesma teoria utilizada por LEITE (2001) para obter o ajuste de massa

$$M_{ar} = M_{an} \times \frac{\gamma_{ar}}{\gamma_{an}}$$

Onde:

M_{ar} = massa de agregado reciclado

M_{an} = massa de agregado natural

γ_{ar} = massa específica de agregado reciclado

γ_{an} = massa específica de agregado natural

Com o ajuste, os traços em massa seguiram a tabela 10:

TABELA 10 - QUANTIDADE EM QUILOS DE MATERIAIS UTILIZADOS EM CADA TRAÇO (EM LABORATÓRIO)

Cimento	Areia	AGN 50%	AGR 50%	Água
18,85	25,22	20,34	18,92	8,48
15,29	28,63	20,27	18,86	8,41
12,86	30,96	20,23	18,82	8,36

Para a produção dos corpos-de-prova, foi obedecida a seguinte sequência no procedimento de mistura: saturar o agregado reciclado com a água de compensação por 24 horas antes do início da mistura; após decorrido este tempo, deixou-se escorrer o excesso de água presente na superfície do RCC (este processo foi feito em peneira 4,8mm de 65x65cm) por 5 minutos antes de entrar na betoneira de eixo inclinado de 400 litros.

Para o início da mistura, foram utilizados apenas os componentes da argamassa (areia e cimento) e 2/3 da água total. Neste processo tentou-se inibir parte do déficit de hidratação que a pasta pode sofrer por conta do alto grau de absorção do agregado reciclado. Depois da mistura da pasta por 2 minutos, foram lançadas as quantidades de agregado reciclado e agregado graúdo natural e a mistura continuou durante 5 minutos.

Com todo o processo executado corretamente, foi avaliado o abatimento no tronco de cone (*slump test*), caso não fosse satisfatório, seria feita a correção com aditivo superplastificante 3ª geração a qual não foi necessária em nenhuma das misturas. Na moldagem foram utilizados corpos de prova de dimensões cilíndricos (2 tipos de dimensões), prismáticos e cúbicos cujo procedimento de moldagem seguiu as recomendações da NBR NM 68 (ABNT, 1998). O adensamento das misturas dentro dos corpos de prova se deu de forma mecânica com vibrador de imersão.

Após a moldagem os mesmos ficaram mantidos no espaço do laboratório por aproximadamente 24 horas. Após este período foram desmoldados e armazenados em câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$, permanecendo nesta até atingirem as idades para serem ensaiados.

4.3 ENSAIOS DE LABORATORIO

Para o concreto no estado fresco foi realizado o ensaio de determinação da massa específica, trabalhabilidade através do *slump test* seguindo os procedimentos da norma NM 67 (ABNT,1998).De acordo com a norma já citada, seguiu-se as seguintes etapas para execução do ensaio:

- Foi utilizado tronco cilíndrico metálico de 24 cm de altura, haste metálica e base em chapa de aço. Uma fina camada de desmoldante foi aplicada sobre as superfícies que seriam colocadas em contato com o concreto, a fim de reduzir a influência do atrito nos resultados.
- O tronco de cone foi preenchido em três etapas, cada uma com adensamento de 25 golpes com haste metálica.
- Após completamente cheio, foi retirado o tronco metálico cuidadosamente e colocado ao lado do tronco de concreto, medindo-se a diferença de altura (abatimento) em centímetros.

No concreto no estado endurecido, além da avaliação da durabilidade, também foi analisada a resistência à compressão das misturas estudadas conforme ABNT NBR 5739:2003. Este ensaio foi realizado em corpos-de-prova com dimensões de 10 cm x 20 cm, na idade de 28 e 63 dias.

4.3.1 Resistência à penetração de íons cloretos (ASTM 1202, 2007)

Este ensaio fornece uma indicação acelerada da resistência do concreto à penetração de íons cloretos. A sua duração é de seis horas e a corrente elétrica passante é registrada em intervalos de trinta minutos, por meio de um amperímetro, a sua execução consiste basicamente em inserir um corpo-de-prova cilíndrico, de 95 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, entre duas meia-células de acrílico, sendo que uma contém uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3N, e a outra com solução de cloreto de sódio (NaCl), com 3% de concentração.

Entre as meias células é gerada uma diferença de potencial de $60 \pm 0,1$ V, originando uma corrente elétrica fazendo com que ocorra a migração do cloreto através do concreto sob a ação de um campo elétrico.

Para este ensaio foi feito o pré-condicionamento das amostras estipulados por norma seguindo as etapas:

- Aplicação de uma camada selante na face curva externa dos corpos de prova
- Aplicação de vácuo durante 3 horas

- No mesmo equipamento utilizado para aplicar o vácuo, foi colocada água destilada de forma que as amostras ficassem todas submersas, e aplicou-se vácuo novamente durante mais 1 hora.
- Deixou-se em repouso as amostras em água destilada durante 18 horas
- Após o período de repouso, as amostras foram retiradas da água destilada e secadas superficialmente de forma cuidadosa.

Com o processo de pre-condicionamento completado, fixou-se as amostras nas células de acrílico com auxílio de cola de silicone.

O ensaio fornece valores de corrente que foram inseridos na Equação 2. Com os valores obtidos de carga passante Q , verifica-se na tabela 11 o risco da penetração de íons cloreto conforme a norma ASTM C1202.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \text{ Equação 2}$$

Onde:

Q – carga passante (coulombs)

I_t - corrente em determinado tempo em minutos (amperes)

TABELA 11 - RISCO DE PENETRAÇÃO AOS IONS CLORETO DE ACORDO COM A CARGA PASSANTE (ASTM C1202)

Carga passante	Risco de penetração
>4000	Alto
2000 a 4000	Moderado
1000 a 2000	Baixo
100 a 1000	Muito baixo
< 100	Desprezível

4.3.2 Resistividade Elétrica Superficial (Método de Wenner; ASTM G57)

Para a medida da resistividade elétrica do concreto foi utilizado um método originalmente proposto por Wenner em 1915 para uso em solos, sendo que este método, também conhecido por Método dos Quatro Eletrodos, foi adaptado e normatizado pela ASTM G 57(2001).

Para confecção dos corpos de prova para o ensaio, foram utilizadas formas metálicas de dimensões 15 x 15 x 15 centímetros. A cura foi feita em câmara úmida de temperatura 21 ± 1 °C durante todo o período de 63 dias, retirada apenas aos 28 e 63 dias para que fosse realizado o ensaio.

Antes da medição de resistividade as amostras eram secas em estufa por 24 horas e depois colocadas em ambiente de umidade e temperatura controlados ($70 \pm 4\%$ e 27 ± 1 °C respectivamente) por 24 horas também.



FIGURA 21 - CORPOS DE PROVA UTILIZADOS PARA O ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETO

Os critérios de avaliação do risco de corrosão foram propostos pelo CEB 192 (1988) como consta na tabela 11.

TABELA 12 - CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO RISCO DE CORROSÃO PROPOSTOS PELO CEB 192 (1988)

Resistividade do concreto	Probabilidade de corrosão
> 20000 ohm.cm	Desprezível
10000 a 20000 ohm.cm	Baixa
5000 a 10000 ohm.cm	Alta
< 5000 ohm.cm	Muito alta

4.3.3 Carbonatação

Os ensaios de carbonatação no concreto foram realizados em câmara de carbonatação com concentração de CO_2 que foi desenvolvida e montada dentro do próprio laboratório de engenharia civil da UFPA. Para elaboração da mesma foi utilizado projeto semelhante ao da câmara existente na UFRGS e UNISINOS – RS devido à experiência que ambas já possuem neste tipo de estudo.

Embora as câmaras referenciadas trabalhem com fluxo de CO_2 , devido a indisponibilidade financeira e de tempo para elaboração de sistema de escape bem como modificações na câmara, foi necessário optar por manter apenas uma entrada de gás. Assim, foi calculado o volume total da câmara e inserido um volume de CO_2 referente a $10 \pm 2\%$ em relação ao volume da câmara.

O controle da entrada do gás na câmara foi feito em litros por minuto com auxílio de rotâmetro feito sob especificações que supriram as necessidades de controle de vazão. Após tempo cronometrado para atingir determinada concentração, as válvulas eram fechadas e o processo repetido toda vez que a câmara era aberta para retirada dos corpos de prova para ensaio.

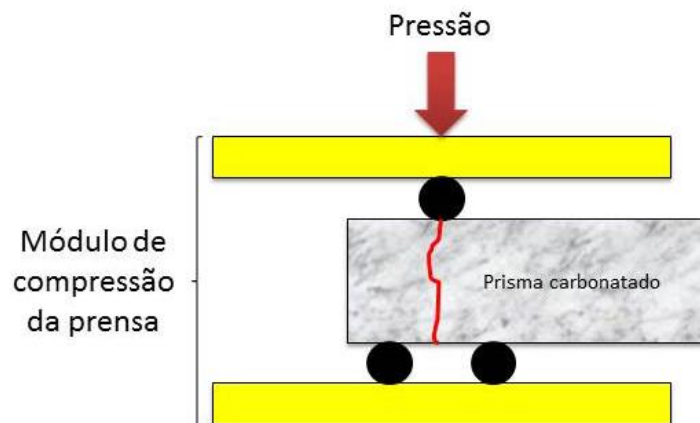
Os corpos de prova utilizados para verificação do avanço da frente de carbonatação foram prismáticos de dimensões 15 x 15 x 35 centímetros, curados em câmara úmida a temperatura de 21°C. Após a etapa de cura úmida e antes de serem colocados na câmara de carbonatação, os corpos de prova foram secos em estufa por 24 horas à 105°C e depois colocadas em sala climatizada à 26°C também por 24 horas.

A cada ensaio, os prismas foram seccionados de forma que as amostras retiradas tivessem espessura em torno de 5 ± 1 centímetros (figura 22). O seccionamento dos prismas foi executado em prensa AMSLER, através de sistema de corte por cisalhamento composto por 3 barras de aço (figura 23).

FIGURA 22 - CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA



FIGURA 23 - SEÇÃO TRANSVERSAL DO SISTEMA DE CISLHAMENTO UTILIZADO PARA CORTE DOS PRISMAS



É importante ressaltar que não foi optado o método de corte utilizando serras elétricas, pois o mesmo poderia durante o corte alterar a microestrutura e principalmente o comportamento dos agregados de RCC que se partiam ou destacavam-se com extrema facilidade do concreto em experimento piloto.

Após as amostras retiradas e devidamente identificadas, aplicou-se solução de fenolftaleína sobre a face interna da seção a fim de identificar as regiões carbonatadas (figura 25). Para composição da solução, foi seguida a proposta do RILEM (2001), na qual se utilizou 70% de álcool PA, 30% de água destilada para 1% de fenolftaleína em pó.

FIGURA 24 - AMOSTRA DA SEÇÃO DO CORPO DE PROVA CARBONATADO APÓS ASPERÇÃO DA SOLUÇÃO DE FENOLFTALEÍNA.



A profundidade de carbonatação foi medida seguindo o procedimento:

- Em uma folha de papel A4 desenha-se um quadrado com mesmas dimensões da seção da amostra. Neste em cada face aresta desenhada eram marcadas 3 medidas de mesmo espaçamento.
- A mostra é colocada sobre o desenho da seção e marca-se a profundidade de carbonatação nos 3 pontos
- Tira-se então a média dos 3 pontos, para cada face e depois a media entre os 4 valores obtidos na amostra.

4.3.4 Absorção de água por capilaridade

Para avaliação da absorção de água por capilaridade foi utilizada a recomendação da metodologia da NBR 9779 (ABNT, 1995).

Os corpos de prova utilizados no ensaio foram cilíndricos e de dimensões 10 x 20 centímetros (figura 26) e moldados em formas metálicas. Um dia após a moldagem eram deformados e colocados em câmara úmida até as datas de ensaio seguindo o mesmo procedimento e condições ambiente de cura dos corpos de prova dos outros ensaios.

FIGURA 25 - CORPOS DE PROVA NO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE



Nas datas de ensaio os corpos eram retirados da câmara úmida e colocados em estufa na temperatura de 105° para secagem durante 24 horas. Decorrido este tempo, os corpos de prova foram retirados e colocados à temperatura ambiente do laboratório durante 30 minutos.

O procedimento foi composto das seguintes etapas:

- Pesou-se o corpo de prova em balança de precisão após secagem em estufa.
- Colocou-se em contato a face circular do corpo de prova com um lamina de água de 5 ± 1 milímetros em um recipiente plano e impermeável.
- Após 30 minutos foi feita a primeira pesagem do corpo de prova. Secou-se cuidadosamente a superfície em contato com a lamina de água com pano seco para retirar o excesso de água antes da pesagem.
- O procedimento anterior se repetiu decorridas 3 e 6 horas de ensaio e depois 24, 48 e 72 horas.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será feita a análise dos resultados obtidos no programa experimental proposto.

É importante ressaltar que a comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa com outras já realizadas foi feita por equivalência dos métodos e resultados, pois houve grande dificuldade devido à ampla variedade de características dos materiais reciclados e das metodologias utilizadas pelos autores.

5.1 CONCRETO NO ESTADO FRESCO

5.1.1 Abatimento

O abatimento do concreto foi parâmetro para produção do gráfico de dosagem que deu origem as misturas desta dissertação, desta forma adotou-se a mesma faixa de abatimento (80 ± 20 mm) para todas as misturas do programa experimental. O abatimento foi medido a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone descrito na NM 9833 (ABNT, 2008 Versão Corrigida: 2009), realizado após 3 minutos da mistura na betoneira. Os resultados medidos (em milímetros) no abatimento estão expressos na tabela 12.

TABELA 13 - ABATIMENTOS EM MILÍMETROS OBTIDOS PARA CADA MISTURA ANALISADA

a/c	Mistura			
	REF	60%	80%	100%
0,45	75	70	80	95
0,55	80	75	90	90
0,65	80	70	80	100

Nota-se que o abatimento dos concretos produzidos foi influenciado diretamente pela taxa de pré-saturação dos agregados reciclados utilizados nas misturas. Aquelas que continham AGRC 60% saturados apresentaram menores abatimentos em relação aos concretos referencia. Vieira (2007) entende este fato

admitindo que agregados de alta porosidade necessitam de mais água para alcançar mesma trabalhabilidade de concretos com agregados naturais. Em contra partida as misturas que continham AGRC 80% e 100% saturados apresentaram maiores abatimentos decorrentes da maior taxa de saturação.

Esta variação de comportamento expressa bem a afirmação de Buttler (2003) que considera que agregados reciclados não saturados tendem a absorver grande quantidade de água e partículas de cimento. Ainda o mesmo autor acredita que parte da água utilizada na saturação de agregados mobiliza-se na pasta fresca quando estes são adicionados à mistura.

Assim, com os resultados de abatimento obtidos nesta pesquisa (gráfico 3), conclui-se que as misturas com menores taxas de saturação tendem a absorver parte da água da pasta fresca acarretando em perdas na trabalhabilidade. Já com o incremento da taxa de saturação, há uma diminuição deste fenômeno liberando a água aprisionada dos poros para a pasta fresca, aumentando a quantidade de água livre e conseqüentemente o abatimento também.

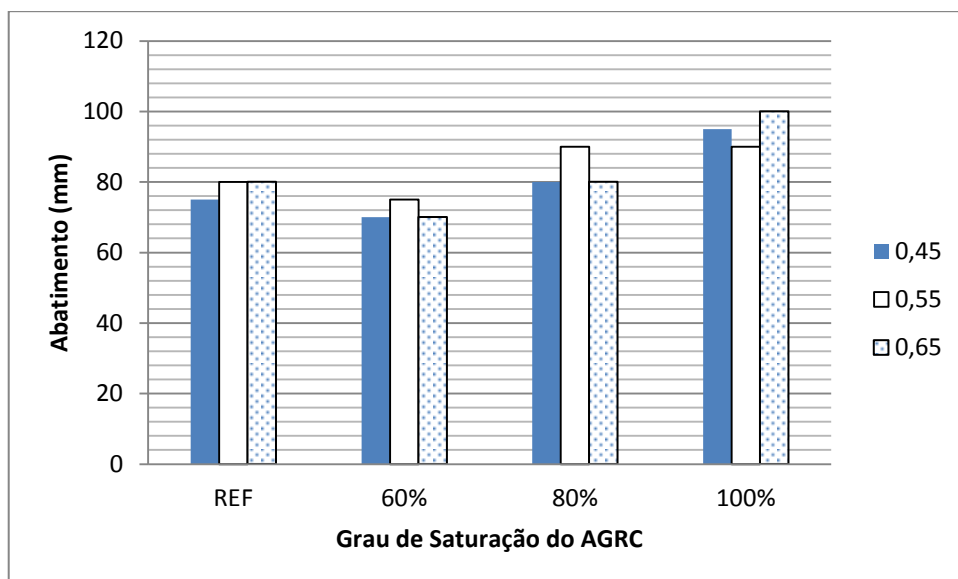


GRÁFICO 3 - ABATIMENTOS EM FUNÇÃO DO TIPO DE MISTURA PARA CADA FATOR A/C

5.2 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

5.2.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial forneceu valores que serviram como parâmetro para avaliar de forma breve o comportamento mecânico dos concretos produzidos. A tabela 14 mostra os valores obtidos através da média de 3 corpos de prova 10 x 20 centímetros ensaiados em cada uma das duas idades para cada uma das misturas e seus fatores água/cimento. O maior acréscimo de desempenho ocorreu na mistura referência (4,75 MPa), e o menor crescimento observado foi de 1,45 MPa na mistura 50% RCC 100% SAT.

TABELA 14 - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA AS IDADES DE 28 E 63 DIAS.

Mistura	a/c	Idade do ensaio (dias)	
		28	63
REF(AGN)	0,45	37,69	40,74
	0,55	29,96	30,43
	0,65	19,61	22,92
50% RCC 60% SAT	0,45	22,45	24,19
	0,55	19,14	21,05
	0,65	10,74	12,35
50% RCC 80% SAT	0,45	29,5	31,96
	0,55	20,88	22,96
	0,65	10,91	13,03
50% RCC 100% SAT	0,45	18,8	21,22
	0,55	14,81	17,53
	0,65	9,46	10,91

Analisando o gráfico 4, notou-se aos 63 dias uma queda de resistência à compressão em todas as misturas que continham agregado cerâmico reciclado, sendo que esta diminuição foi mais evidente quanto menor o fator água/cimento nas misturas com AGCR saturados em 60% e 100%. O mesmo comportamento foi observado por Bazuco (1999) que constatou que para maiores fatores água/cimento estas diferenças tendem a ser menores

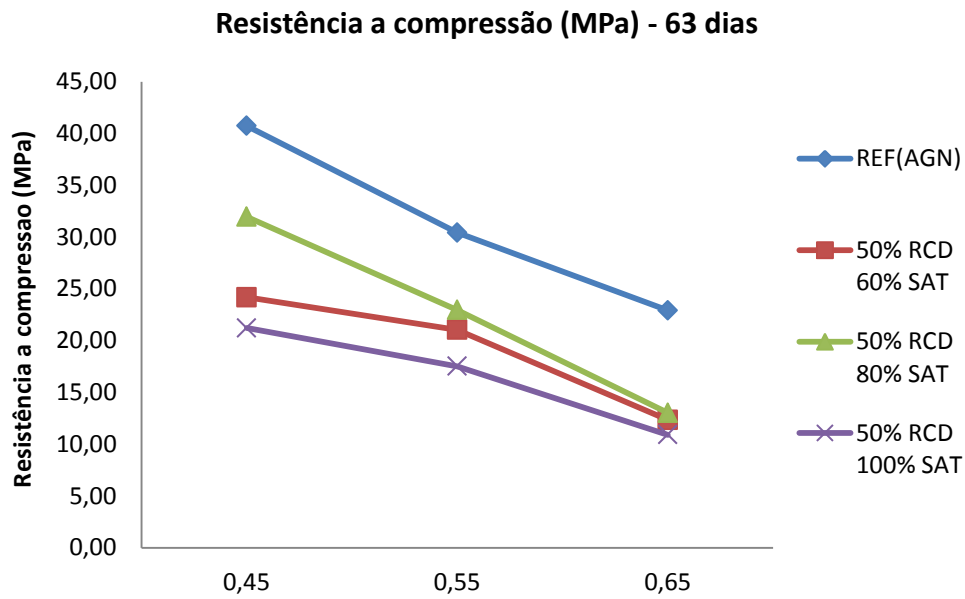


GRÁFICO 4 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AOS 63 DIAS PARA CADA MISTURA E FATORES A/C.

As quedas de resistência e a pré-saturação parcial ou total dos agregados reciclados utilizados nesta pesquisa estão interligadas através do seguinte mecanismo: Leite (2001) explica a diminuição de resistência ao se utilizar AGR baseando-se na própria propriedade mecânica dos agregados reciclados que embora proporcionem uma zona de transição mais densificada e a interface entre pasta e agregado melhor aderida, quando este agregado é solicitado à compressão este tende a ter menor desempenho em relação agregados naturais. A grande quantidade de microfissuras característica de AGR fragiliza-o tornando menos resistente em relação à pasta de cimento e conseqüentemente fazendo com que haja uma queda na resistência do sistema.

Agregados reciclados de alta porosidade pré-saturados tendem a manter uma película de água adsorvida nos poros o que dificulta a penetração da pasta de cimento diminuindo assim a interface de “atracção” entre agregado e pasta originando um descolamento entre pasta e agregado com facilidade no momento da compressão. Sendo assim a resistência do agregado cerâmico embora baixa, mas existente, passa a ser desconsiderada pelo sistema pois a ruptura tende a não ocorrer no agregado.

Nesta pesquisa quando se utilizou 100% de saturação pode-se perceber claramente nos gráficos 5, 6 e 7 que as misturas desta família apresentaram os

piores desempenhos quanto à resistência à compressão, chegando a uma queda de 52% para um fator a/c de 0,65.

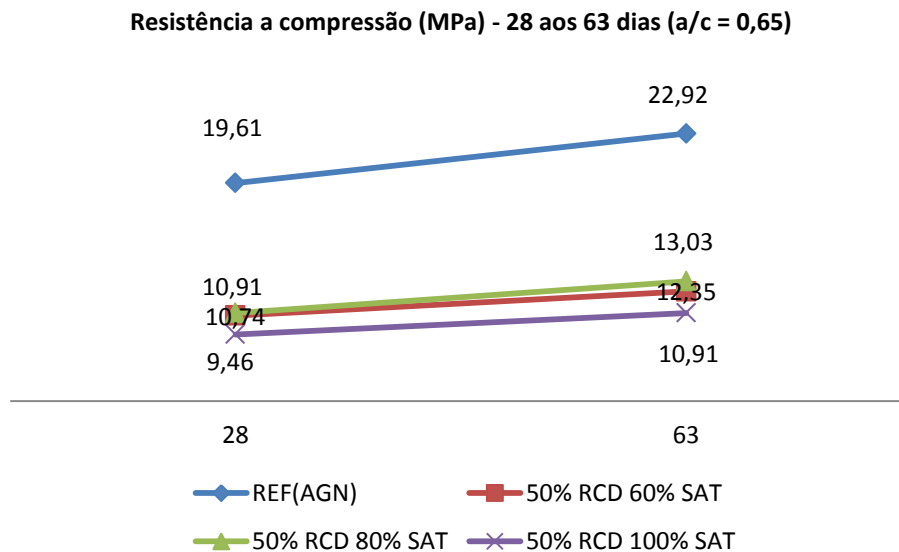


GRÁFICO 5 - RESISTENCIA A COMPRESSÃO DAS MISTURAS AOS 28 3 63 DIAS PARA O FATOR ÁGUA/CIMENTO DE 0,65.

Além de famílias com agregados totalmente saturados, esta pesquisa avaliou também duas famílias parcialmente saturada em 60% e 80%, nas quais a segunda porcentagem apresentou os melhores valores.

Esperava-se nesta pesquisa que os melhores resultados para os concretos conforme fosse menor a taxa de saturação dos agregados. Machado e Agnesini (1999) propõem que agregados de alta porosidade e alta taxa de absorção poderiam propiciar um incremento na resistência dos concretos devido a melhor aderência da pasta (mecanismo já citado anteriormente) e uma possível cura interna. Salem e Burdette (1998) afirmam que a água consumida pela absorção do agregado tende a diminuir o fator a/c das matrizes das misturas podendo proporcionar ganhos de resistência.

No entanto os autores citados anteriormente trabalharam com agregados de maior resistência e menor porosidade, utilizaram métodos de britagem diferentes da presente pesquisa, o que dificulta uma comparação simples que afirmasse que no caso de agregados cerâmicos de baixa resistência também haveria existência dos fenômenos sugeridos pelos mesmos.

Na presente dissertação, ao se utilizar 60% e 80% de saturação nos AGRC, supõe-se que houve a presença, em diferentes proporções, das situações citadas por estes autores. O efeito da aderência, da diminuição do fator a/c e da cura interna pode ter ocorrido nestas misturas em intensidades diferentes e devido à limitação desta pesquisa os mesmos não puderam ser quantificados.

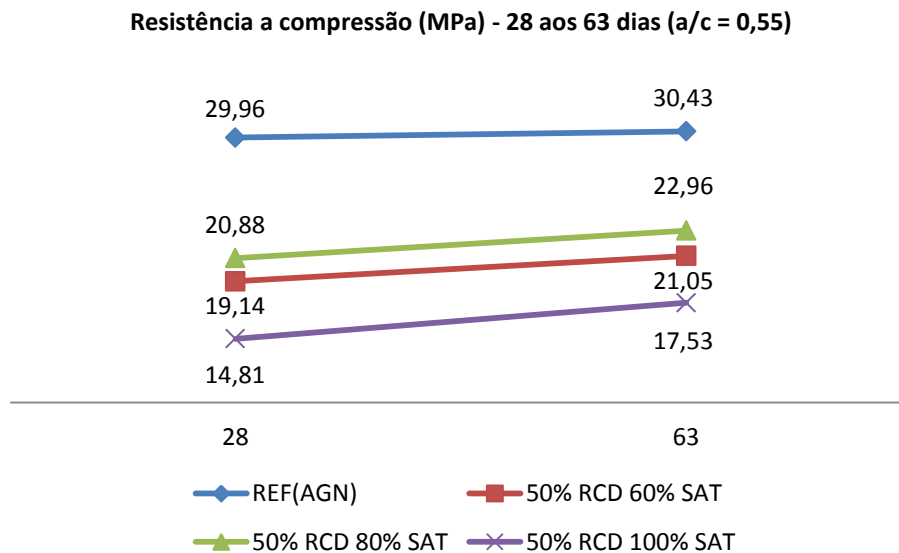


GRÁFICO 6 - RESISTENCIA A COMPRESSÃO DAS MISTURAS AOS 28 3 63 DIAS PARA O FATOR ÁGUA/CIMENTO DE 0,55.

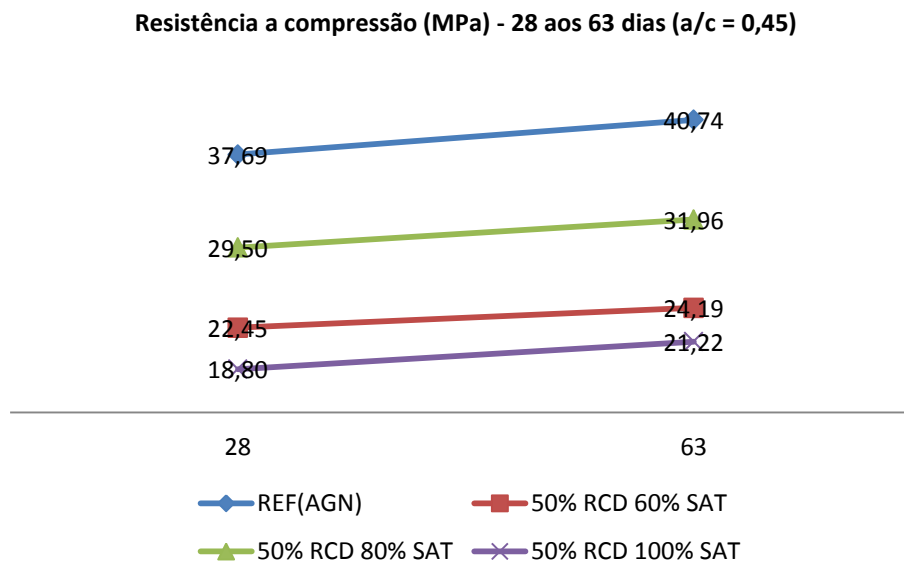


GRÁFICO 7 - RESISTENCIA A COMPRESSÃO DAS MISTURAS AOS 28 3 63 DIAS PARA O FATOR ÁGUA/CIMENTO DE 0,45.

Analisando os gráficos 5, 6 e 7 em conjunto, o menor e maior decréscimos de resistência foram de 22% e 52%, ocorrendo aos 28 dias para a mistura com AGCR 80% saturado e relação a/c de 0,45 e aos 63 dias para a mistura com AGCR 100% saturado e relação a/c de 0,65 respectivamente.

As perdas de resistência máxima e mínima concordam e são semelhantes com as faixas de valores observados por trabalhos de outros autores que abordaram situações equivalentes. Algumas faixas de decréscimos de resistência a compressão, observadas em misturas que continham AGR, independente da natureza do agregado, constam na tabela 15.

TABELA 15 - COMPARATIVO DAS PERDES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM OUTRAS PESQUISAS.

Autor	Data	Decréscimo (%)	
		Mínimo	Máximo
Hansen	1992	15	30
Topçu e Gunçan	1995	15	80
Zordan	1997	x	50
Levy e Helene	2000	23	37
Leite	2001	x	33
Brito	2005	22	44
Sani	2005	x	30
Cabral	2007	19	38
Reis	2013	22	52

Contudo, segundo Cabral (2007), a utilização de agregados graúdos de origem cerâmica exerce maior influencia nas perdas de resistência à compressão. Fato que pode explicar a perda de mais de 50% de resistência em relação aos outros autores que obtiveram menores porcentagens ao utilizar agregados graúdos de concreto.

Quanto à taxa de saturação, Oliveira e Vasques (1996), observaram que o grau de saturação dos agregados reciclados exerce influencia negativa na resistência do concreto principalmente quando estes estão totalmente secos ou saturados. Embora estes autores tenham obtidos estes resultados referentes à agregados reciclados de concreto com taxa de absorção de 7,7% , os resultados desta dissertação envolvendo agregados de origem cerâmica (com taxa de absorção de 9,8%) apresentam resultados equivalentes ,nas devidas proporções, para o tipo de agregado utilizado neste trabalho, quanto mais seca foi a quantidade de

agregados utilizados menor foi a resistência, ocorrendo decréscimos também para quando os agregados estavam totalmente saturados.

Por fim, em todas as idades avaliadas na presente pesquisa, levando-se em consideração apenas as misturas com o AGRC, pode-se concluir que com a variação da taxa de compensação o comportamento mecânico do concreto quando esta foi de 80% teve melhor influencia conforme foi menor o fator água cimento.

5.2.2 Absorção de água por capilaridade

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade para as misturas referência e para as misturas contendo AGCR pré-saturados totalmente ou parcialmente, bem como a análise de variância sobre as variáveis abordadas. Na tabela 16 estão contidos os valores médios expressos em grama por centímetro quadrado da área da seção das amostras.

TABELA 16 - RESULTADOS DO ENSAIO DE CAPILARIDADE AOS 28 E 63 DIAS.

Mistura	28 dias			63 dias		
	0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	0,65
Referência	0,68	0,98	1,06	0,59	0,87	0,96
AGRC 60% Saturado	0,79	1,05	1,20	0,76	1,03	1,08
AGRC 80% Saturado	0,70	1,04	1,15	0,68	0,95	1,02
AGRC 100% Saturado	1,04	1,20	1,44	0,99	1,09	1,27

Para uma melhor visualização e comparação dos resultados, na tabela 17 fez-se a relação proporcional entre misturas com AGRC e convencionais.

TABELA 17 - VALORES EM FUNÇÃO DO TIPO DE MISTURA E O FATOR ÁGUA/CIMENTO UTILIZADO

Mistura	28 dias			63 dias		
	0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	0,65
Referência	1	1	1	1	1	1
AGRC 60% Saturado	1,16	1,07	1,13	1,29	1,18	1,13
AGRC 80% Saturado	1,03	1,06	1,08	1,15	1,09	1,06
AGRC 100% Saturado	1,53	1,22	1,36	1,68	1,25	1,32

5.2.2.1 Influência da presença do AGRC na absorção por capilaridade

A análise de variância ANOVA quanto à porcentagem de substituição de agregado natural pelo AGRC consta na tabela 18.

TABELA 18 - ANOVA PARA O A PRESENÇA DO AGRC X ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Efeito	ss	DF	MS	F	p
Teor de AGRC	0,38743	1	0,38743	9,562	0,002853
Erro	2,83637	70	0,04052		

A análise de variância resultou em um valor de r^2 de 0,9871 o que se leva a concluir que os resultados desta variável possuem alto nível de confiabilidade.

Observou-se nos resultados que todas as misturas que continham AGRC apresentaram maior absorção em relação às misturas referência como já era esperado. O mesmo foi constatado por Troian (2010) quando a autora avaliou a absorção em concretos que continham agregados graúdos de concreto. Sendo assim, analogamente, pode-se afirmar que baseado nas observações desta autora e do presente trabalho, a presença de AGR aumenta a capacidade de absorção de água no concreto.

Além da observação quanto a presença do RCC em comparação ao concreto referência, todas as misturas que continham agregados cerâmicos reciclados, independentemente do grau de saturação, seguem as mesmas observações feitas por Wirquin *et al.* (2000) que afirmou que pode-se fazer uma analogia entre o processo de absorção de água nos concretos com agregados reciclados e nos concretos com agregados naturais, os quais obedecem as mesmas leis de absorção capilar. O comportamento da absorção das misturas ao longo das 72 horas pode ser observado na sequencia de gráficos 8 a 15 nos quais constam os valores obtidos a partir da média de 3 corpos de prova (em g/cm²) em função da raiz do tempo (horas).

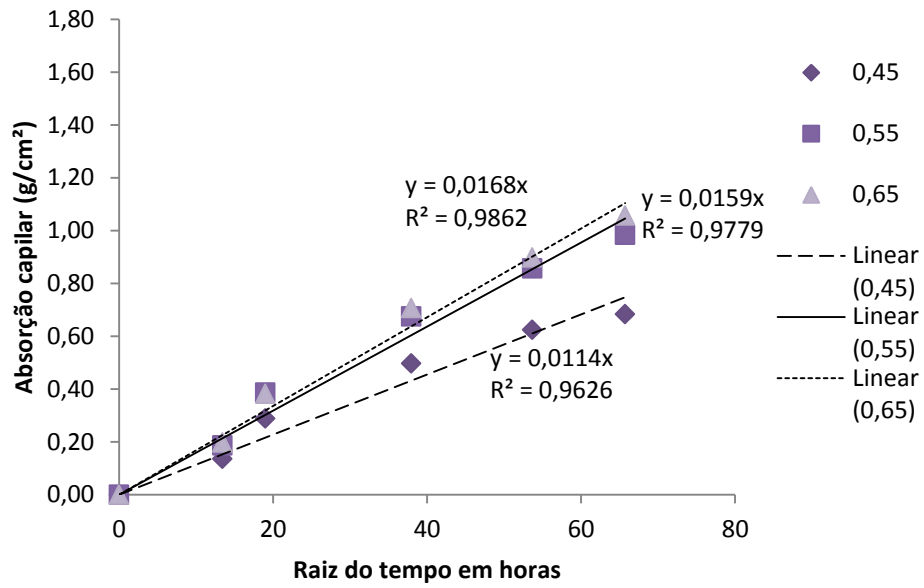


GRÁFICO 8 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO REFERÊNCIA AOS 28 DIAS.

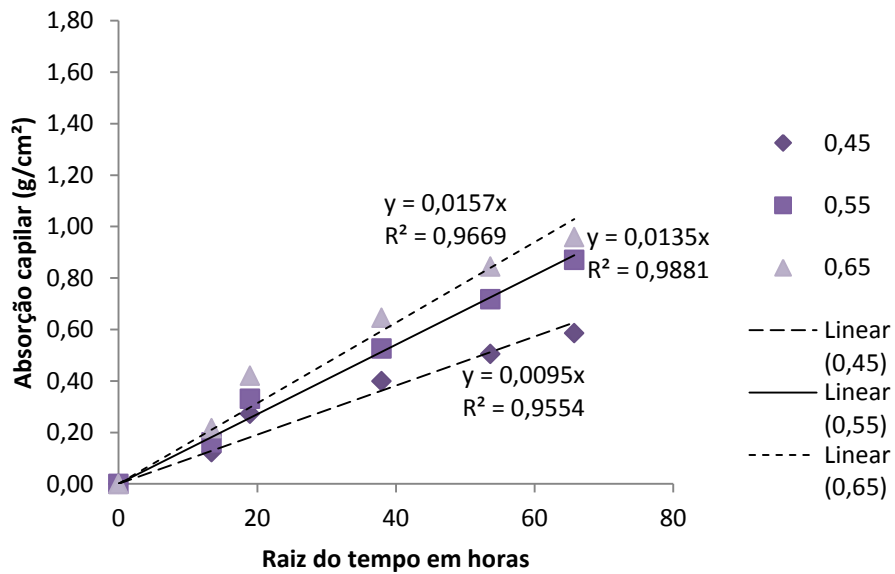


GRÁFICO 9 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO REFERÊNCIA AOS 63 DIAS.

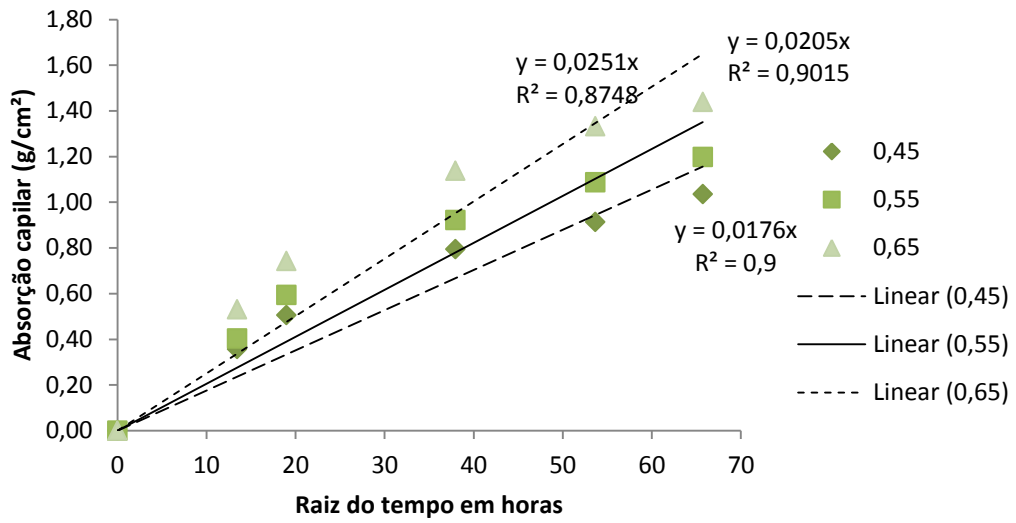


GRÁFICO 10 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 100% PRÉ-SATURADOS AOS 28 DIAS.

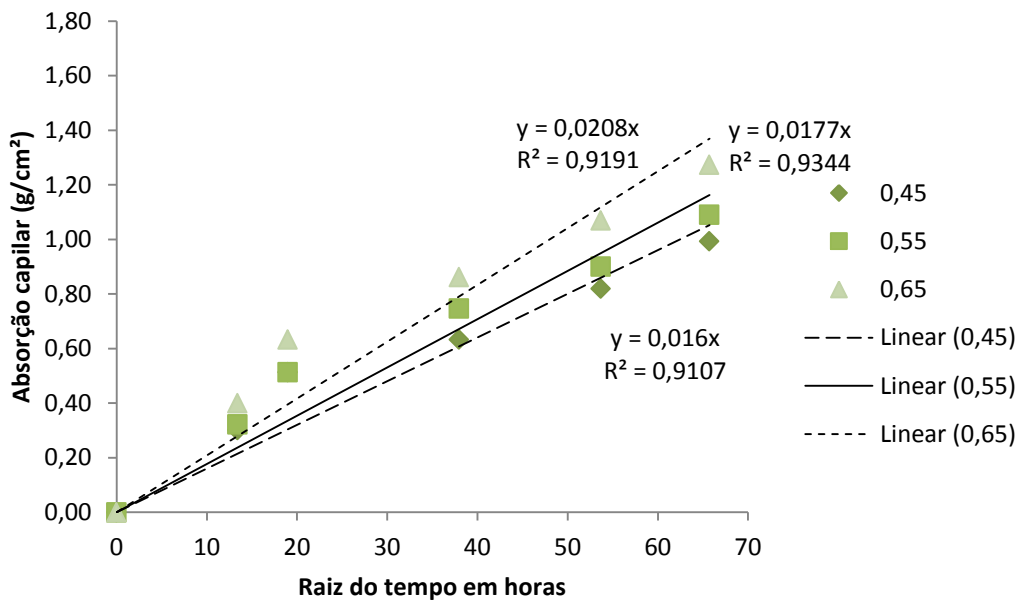


GRÁFICO 11 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 100% PRÉ-SATURADOS AOS 63 DIAS.

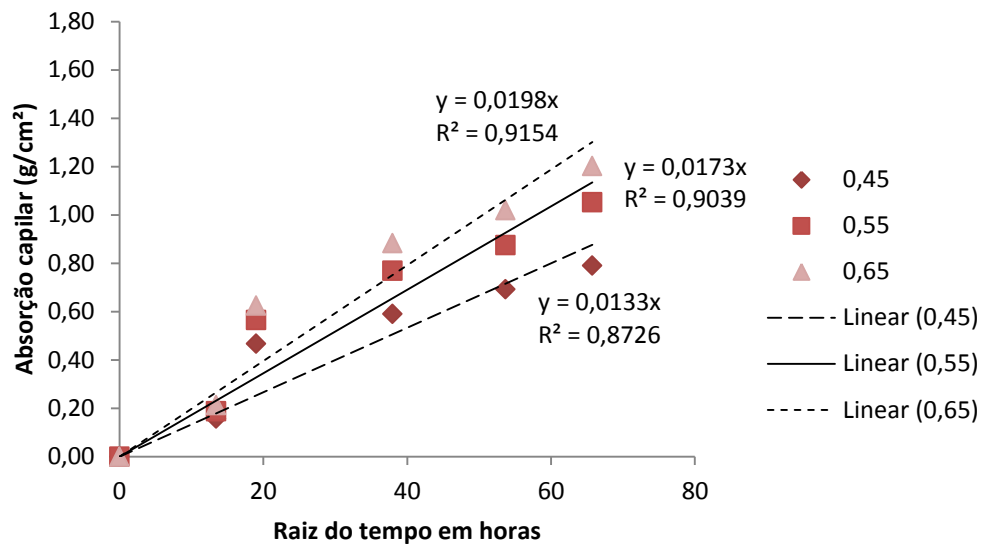


GRÁFICO 12 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 60% PRÉ-SATURADOS AOS 28 DIAS.

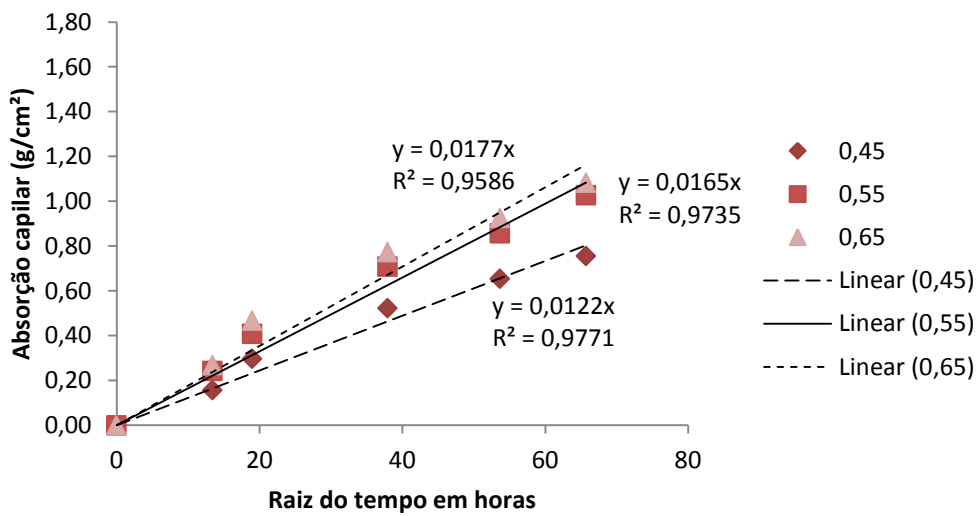


GRÁFICO 13 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 60% PRÉ-SATURADOS AOS 63 DIAS.

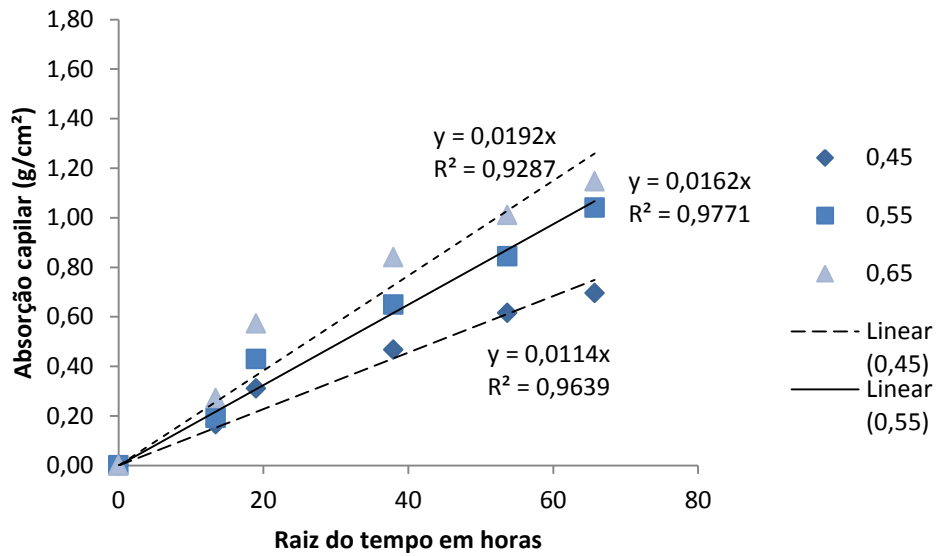


GRÁFICO 14 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 80% PRÉ-SATURADOS AOS 28 DIAS.

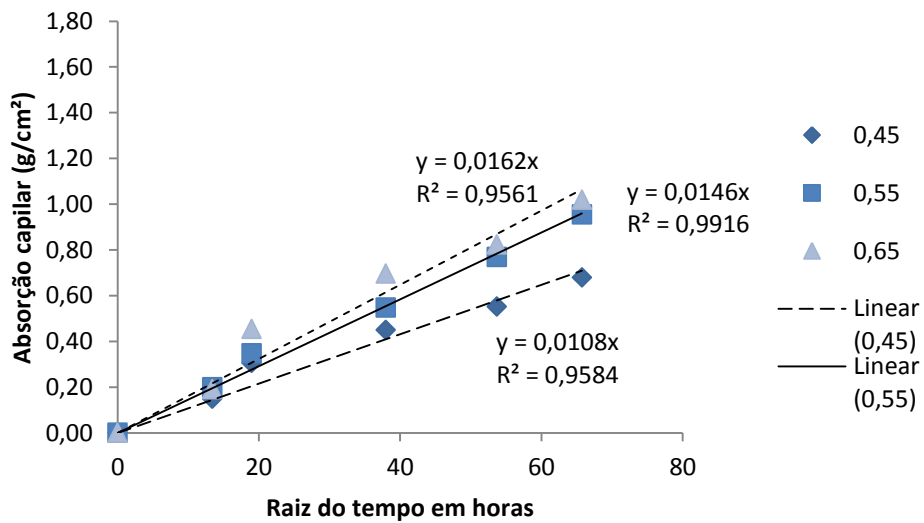


GRÁFICO 15 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE AO LONGO DE 72 HORAS – CONCRETO COM AGRC 80% PRÉ-SATURADOS AOS 63 DIAS

5.2.2.2 Influência da idade, taxa de saturação e fator a/c na absorção por capilaridade

A fim de avaliar as variáveis presentes nas misturas com AGRC foi feita uma análise de variância ANOVA para que se pudesse observar quais os níveis de significância de cada uma em relação à absorção de água. Na tabela 19 constam os resultados da ANOVA para as variáveis idade, taxa de saturação e fator a/c.

TABELA 19 - TABELA DA ANOVA PARA AS VARIÁVEIS ESTUDADAS

Efeito	ss	DF	MS	F	p
Idade	0,08676	1	0,08676	13,224	0,000673
Taxa de saturação	0,60446	2	0,30223	46,066	0,000000
Fator a/c	1,25390	2	0,62695	95,561	0,000000
Erro	0,31492	48	0,00656		

A partir da análise de variância da tabela 18, nota-se que as variáveis “taxa de saturação” e “fator a/c” apresentam uma forte significância enquanto que a variável “Idade” embora tenha se mostrado significativa tem menor influência nas misturas com AGRC. A influência dos efeitos de cada variável consta nos gráficos 16, 17 e 18.

Quanto à variável “idade”, analisando o gráfico 16 e os resultados obtidos, nota-se um comportamento semelhante para todos os teores de pré saturação; para idades mais avançadas, em todas as misturas analisada, os concretos tenderam a absorver menos água, com uma menor absorção pelos concretos com AGRC 80% saturados tanto aos 28 como aos 63 dias quando comparado com as demais misturas com AGRC. Esta situação pode ser explicada pelo avanço do grau de hidratação dos concreto conforme maior a idade.

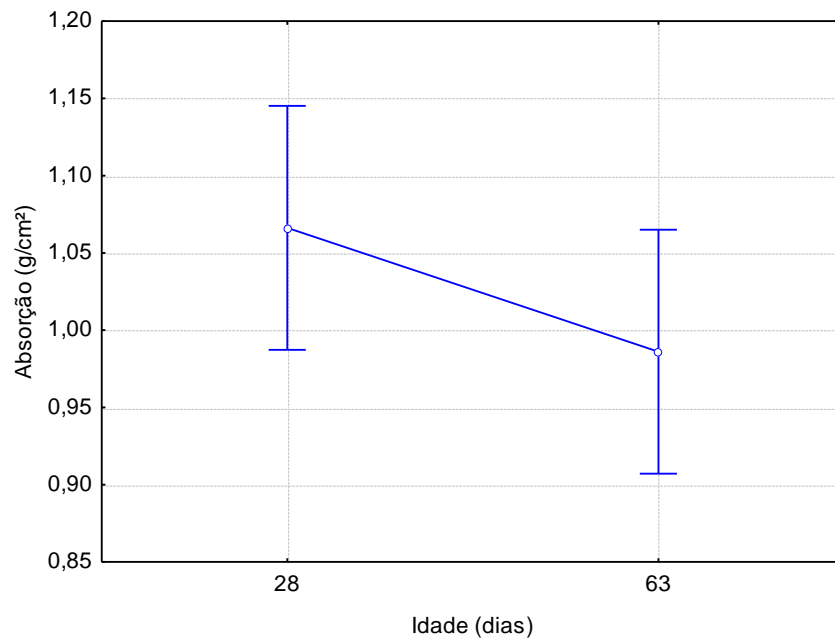


GRÁFICO 16 - EFEITO DA VARIÁVEL “IDADE” NA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CONCRETOS COM AGRC.

Nas misturas que continham AGRC 80% saturados o maior acréscimo (em gramas por centímetro quadrado) foi de 8% aos 28 dias. Aos 63 dias o maior acréscimo de absorção foi de 15% em relação à mistura referência. Para os concretos com AGRC 60% saturados aos 28 dias o maior acréscimo de absorção foi de 16% em relação ao concreto referência, já aos 63 dias o maior acréscimo de absorção foi de 29%.

Os concretos que continham AGRC 100% saturados alcançaram valores de absorção capilar até 68% maiores ao final de 72 horas de ensaio na idade de 63 dias em comparação com os concretos referência.

Embora o comportamento seja análogo, a cura até os 63 dias favoreceu melhor aos concretos referência quando a colmatação dos poros parece ter evoluído bem mais em relação os concretos que continham AGRC, fato semelhante ao observado por Levy (2001) que embora tenha trabalhado com ensaios de absorção por imersão a comparação é válida pelo tipo de AGR utilizado pelo autor que se assemelha ao desta pesquisa.

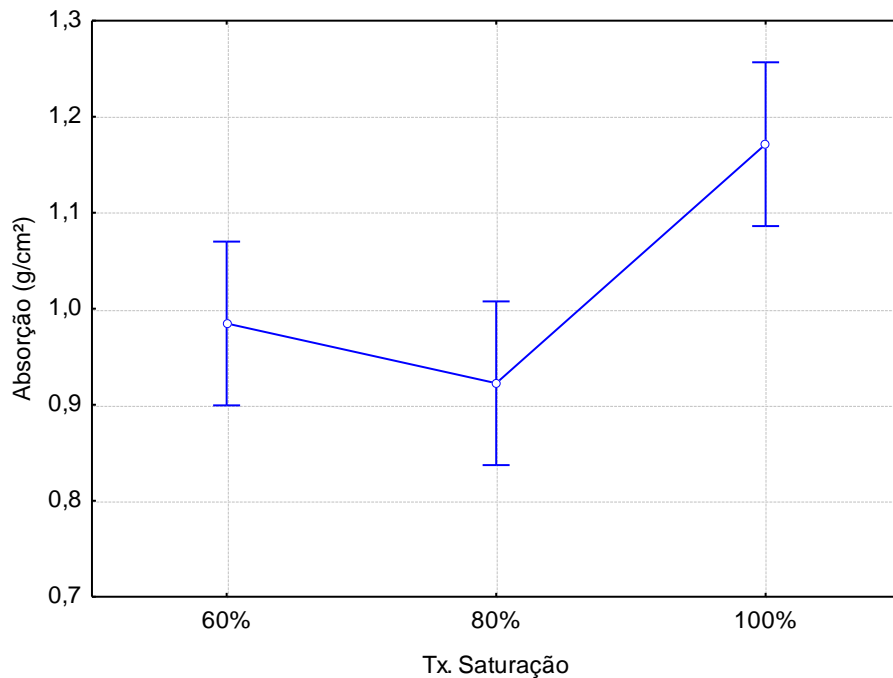


GRÁFICO 17 - EFEITO DA VARIÁVEL “TAXA DE SATURAÇÃO” NA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CONCRETOS COM AGRC.

Com relação às três taxas de saturação empregadas nesta dissertação, é interessante levantar algumas observações a respeito dos resultados esperados e os resultados obtidos.

O gráfico 17 mostra que concretos produzidos com AGRC com taxa de saturação de 80% apresentam em média menores valores de absorção em relação aqueles produzidos com AGRC 60% e 100% pré-saturados.

Em especial para os concretos com AGRC 100% saturados avaliados, pode-se explicar os maiores valores de absorção, variando de 22% a 68% fazendo-se uma analogia a uma observação feita por Buttler (2003) em sua pesquisa. Este autor levanta a hipótese da influencia da argamassa aderida na superfície de agregados reciclados de concreto. Quanto mais argamassa, maior tende a ser a taxa de absorção.

A partir da afirmativa deste autor conclui-se que para os concretos produzidos com agregados cerâmicos, que por si só já tem maior taxa de absorção, o mecanismo de “atracação” (já explicado no item 5.1) entre a matriz e o AGRC é mais frágil quanto mais saturados estiverem os agregados, fazendo com que a porosidade característica da cerâmica eleve a porosidade do concreto.

De certa forma, no presente estudo houve uma confirmação sobre a utilização de agregados de elevada porosidade utilizados no estado 100% pré-saturado. Estes tenderam aumentar bastante a capacidade de absorção do concreto em função da maior conectividade existente na estrutura dos poros da interface pasta/agregado.

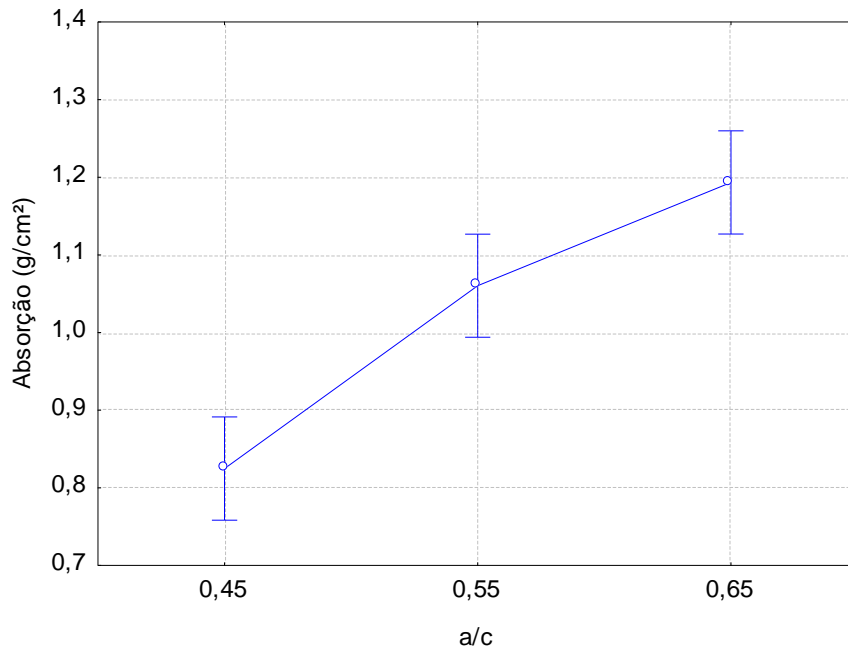


GRÁFICO 18 - EFEITO DA VARIÁVEL "FATOR A/C" NA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE NOS CONCRETOS COM AGRC.

Assim como para as misturas de concretos convencionais, para os concretos com agregados reciclados cerâmicos, o aumento do fator água cimento tendeu a aumentar a absorção do concreto produzido como se pode observar no gráfico 18. Como já era esperado, nesta dissertação, sempre os maiores valores de absorção ocorreram para o maior fator água/cimento utilizado na mistura.

Comparando com as misturas referência que resultaram em concretos com absorções médias de 0,63 g/cm², 0,92 g/cm² e 1,01 g/cm² para os fatores água/cimento 0,45, 0,55 e 0,65 respectivamente, com as misturas que continham AGRC que resultaram em valores médios de 0,82 g/cm², 1,06g/cm²e 1,19g/cm², nota-se que houve um aumento médio de 20% nos valores com a maior absorção chegando a 30% em relação a mistura referência.

Gomes e Brito (2009) encontraram um valor máximo de 16,6% de absorção em relação aos concretos referência, Werle (2010) 35%, Troian (2010) o valor médio

de 25%. É importante ressaltar que estes autores utilizaram agregados graúdos provenientes de concretos de diversas faixas de resistência, entretanto é válida a comparação com o resultado encontrado nesta pesquisa pois aparentemente o tipo do agregado parece não fazer muita diferença na absorção quando os resultados aqui encontrados mantiveram-se na faixa de valores já obtidos por estes autores quando utilizaram agregados de RCC com características diferentes da cerâmica.

5.2.3 Carbonatação acelerada.

São apresentados na Tabela 20 os valores das profundidades de carbonatação para todas as misturas e os coeficientes de carbonatação (KCO_2) obtidos a partir da inclinação da reta de regressão linear em milímetros *versus* o tempo em raiz de semanas. Os valores das profundidades carbonatadas são resultantes da média das medidas das 4 faces extraídas do corpo de prova prismático.

TABELA 20 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA O TEMPO DE EXPOSIÇÃO NA CAMARA, MISTURAS E FATORES ÁGUA/CIMENTO.

Mistura	Fator a/c	Profundidade de carbonatação (mm) x idades (dias)						KCO ₂ (mm/√sem)
		0	3	7	14	21	28	
REF (AGN)	0,45	0	2,68	3,3	4,48	4,50	4,54	2,2663
	0,55	0	2,8	4,89	5,18	5,44	5,48	2,7467
	0,65	0	4,21	5,77	6,18	6,27	6,42	3,0393
60% SAT (AGR)	0,45	0	4,39	4,61	4,91	5,98	6,38	2,8536
	0,55	0	5,06	7,02	7,23	7,84	8,14	3,8299
	0,65	0	5,54	7,70	7,99	8,56	8,92	4,1959
80% SAT (AGR)	0,45	0	2,05	2,20	3,04	4,28	4,78	2,3094
	0,55	0	3,92	5,20	5,49	6,33	6,67	3,1399
	0,65	0	4,76	6,78	6,98	8,52	11,25	5,0096
100% SAT (AGR)	0,45	0	2,93	3,52	3,44	5,83	6,20	2,9239
	0,55	0	4,31	6,09	8,28	8,58	9,35	4,6647
	0,65	0	4,36	6,21	10,87	12,12	16,13	7,8532

No conjunto de gráficos 19 são apresentadas as linhas de tendência para todas as misturas e fatores água cimento utilizados. A partir do alinhamento dos dados obtiveram-se os valores de r^2 e as equações do tipo $y=ax+b$ d nas quais o valor de “A” representa o coeficiente de carbonatação destacados na Tabela 21.

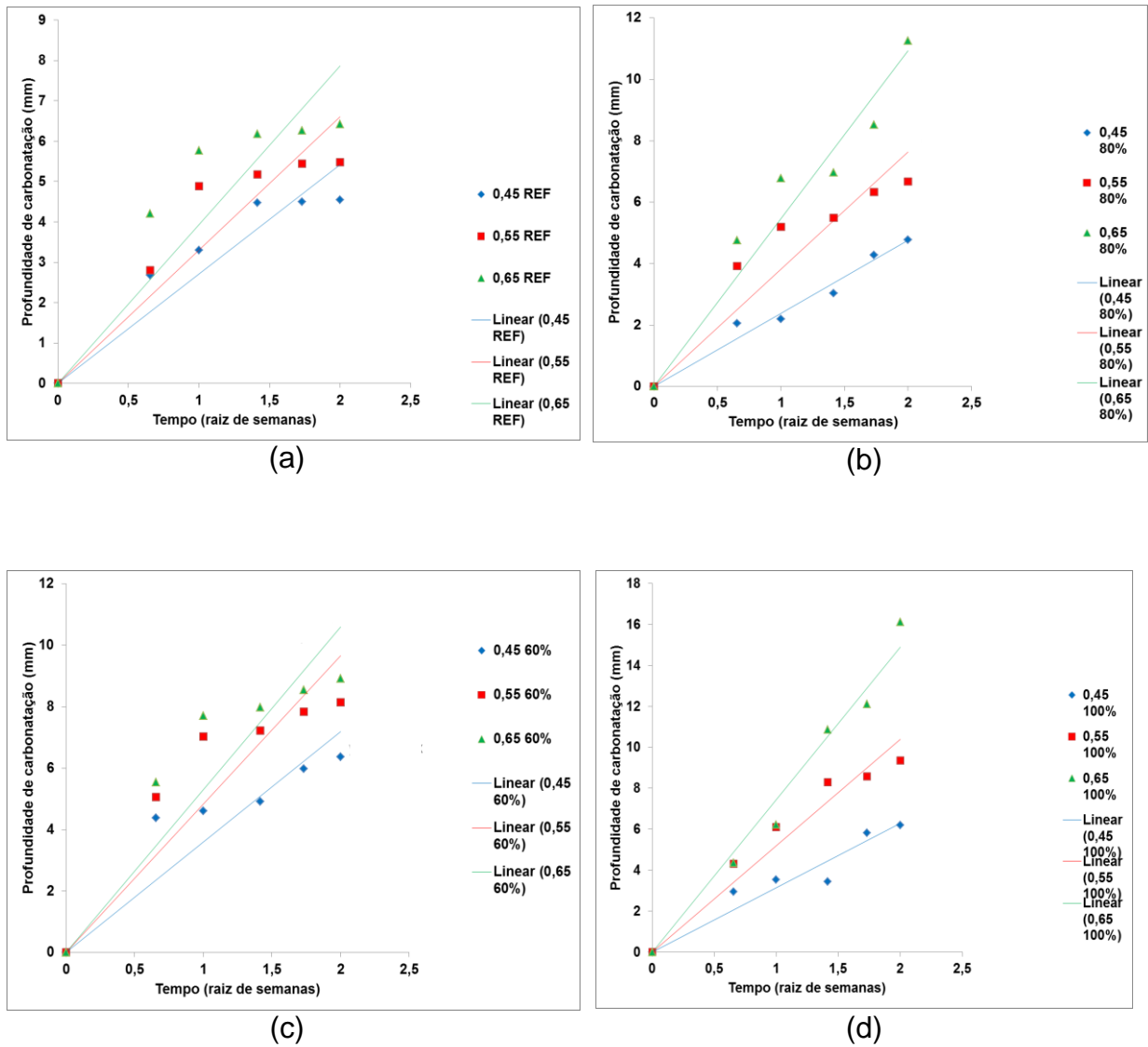


GRÁFICO 19 - RETA DE REGRESSÃO LINEAR PARA AS MISTURAS REFERÊNCIA (A), 60% SATURADAS (B), 80% SATURADAS (C) E 100% SATURADAS (D).

TABELA 21 - TABELA DE EQUAÇÕES E r^2 PARA RESTAS DE REGRESSÃO LINEAR.

Mistura	Fator a/c	Equação da reta linear	r^2
REF (AGN)	0,45	$y = 2,2663x + 0,6798$	0,89
	0,55	$y = 2,7467x + 0,8524$	0,86
	0,65	$y = 3,0393x + 1,3646$	0,81
60% SAT (AGR)	0,45	$y = 2,8536x + 1,1419$	0,85
	0,55	$y = 3,8299x + 1,5396$	0,84
	0,65	$y = 4,1959x + 1,694$	0,84
80% SAT (AGR)	0,45	$y = 2,3094x + 0,1066$	0,97
	0,55	$y = 3,1399x + 1,0435$	0,89
	0,65	$y = 5,0096x + 0,7029$	0,94
100% SAT (AGR)	0,45	$y = 2,9239x + 0,3403$	0,92
	0,55	$y = 4,6647x + 0,815$	0,95
	0,65	$y = 7,8532x - 0,622$	0,98

A fim de avaliar as variáveis presentes nas misturas com AGRC foi feita uma análise de variância ANOVA para que se pudesse observar quais os níveis de significância de cada uma em relação ao fenômeno de carbonatação. Na tabela 22 constam os resultados da ANOVA para as variáveis “tipo da mistura”, “idade de exposição ao CO₂” e “fator a/c”.

TABELA 22 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS PRESENTES NO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Efeito	ss	DF	MS	F	p
Tipo da mistura	45,207	3	15,069	7,8797	0,000159
Idade de exposição ao CO ₂	478,116	5	95,623	50,0020	0,000000
Fator a/c	106,848	2	53,424	27,9359	0,000000
Erro	116,656	61	1,912		

A partir da análise de variância da Tabela 21, conclui-se que as variáveis “idade de exposição” e “fator a/c” apresentam uma forte significância enquanto que a

variável “tipo da mistura”, embora também tenha se mostrado significativa, tem menor influência nas misturas com AGRC. A influência média dos efeitos de cada variável consta nos gráficos 20, 21 e 22.

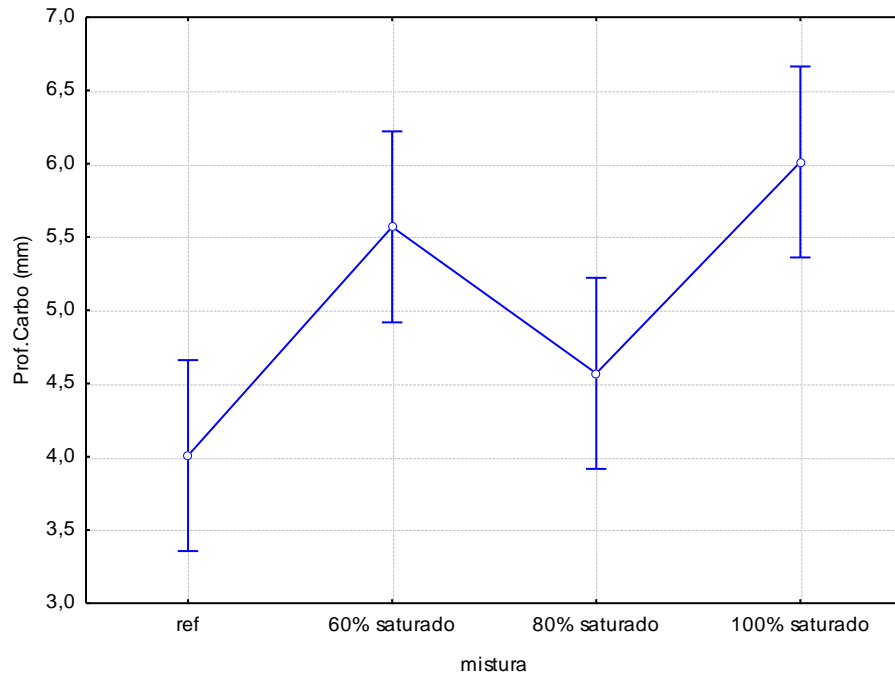


GRÁFICO 20 - EFEITO DA VARIÁVEL “TIPO DA MISTURA” NA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

De acordo com o gráfico 20, como já era esperado, os concretos referência apresentaram em média menores profundidades de carbonatação em relação aos concretos que continham AGRC. Para estes últimos, as menores profundidades de carbonatação ocorreram para as misturas que continham AGRC 80% saturados e as maiores profundidades observadas nas misturas que continham AGRC 100% saturados.

Durante o tempo de exposição na câmara de gás carbônico, em média os maiores acréscimos na profundidade de carbonatação ocorreram nos períodos de 0 à 3 e 3 à 7 dias como mostra o gráfico 21. Esta observação também foi feita por Pauletti (2009) que em seu estudo sobre a carbonatação observou que as profundidades carbonatadas eram maiores nas primeiras idades, assim pode-se afirmar que os concretos produzidos com AGRC também obedecem ao mesmo comportamento.

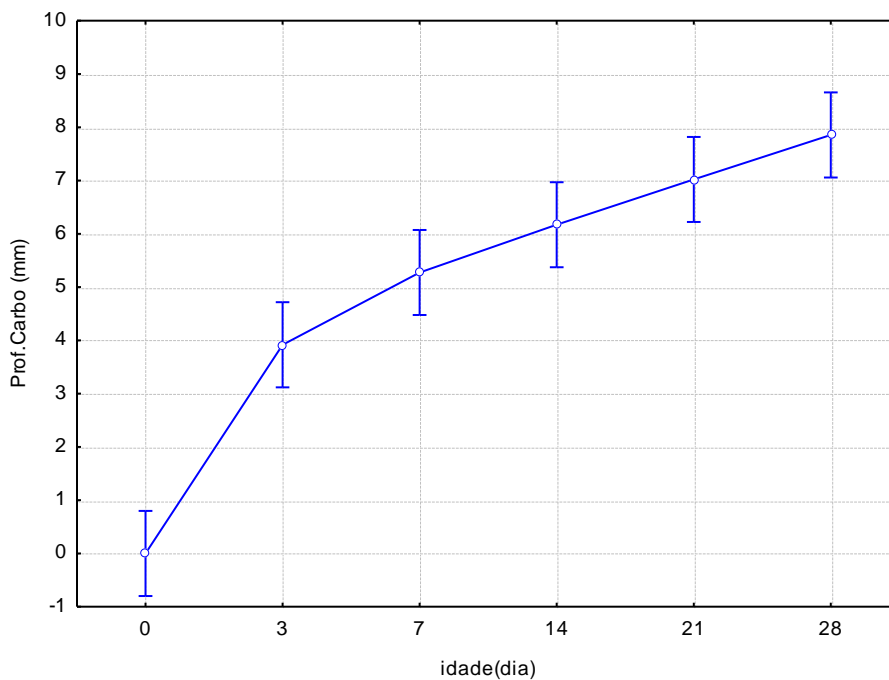


GRÁFICO 21 - EFEITO DA VARIÁVEL "IDADE (DIAS)" NA PROFUNDIDADE CARBONATAÇÃO

No entanto é importante observar que durante a evolução do tempo em dias de exposição, ao teor de 12% de gás carbônico, o comportamento do avanço da profundidade de carbonatação ocorreu de forma diferente entre os tipos de mistura. A sequencia de gráficos "A", "B", "C", "D" e "E" da figura 26 mostra a evolução das profundidades de carbonatação para cada tipo e mistura e idade avaliada.

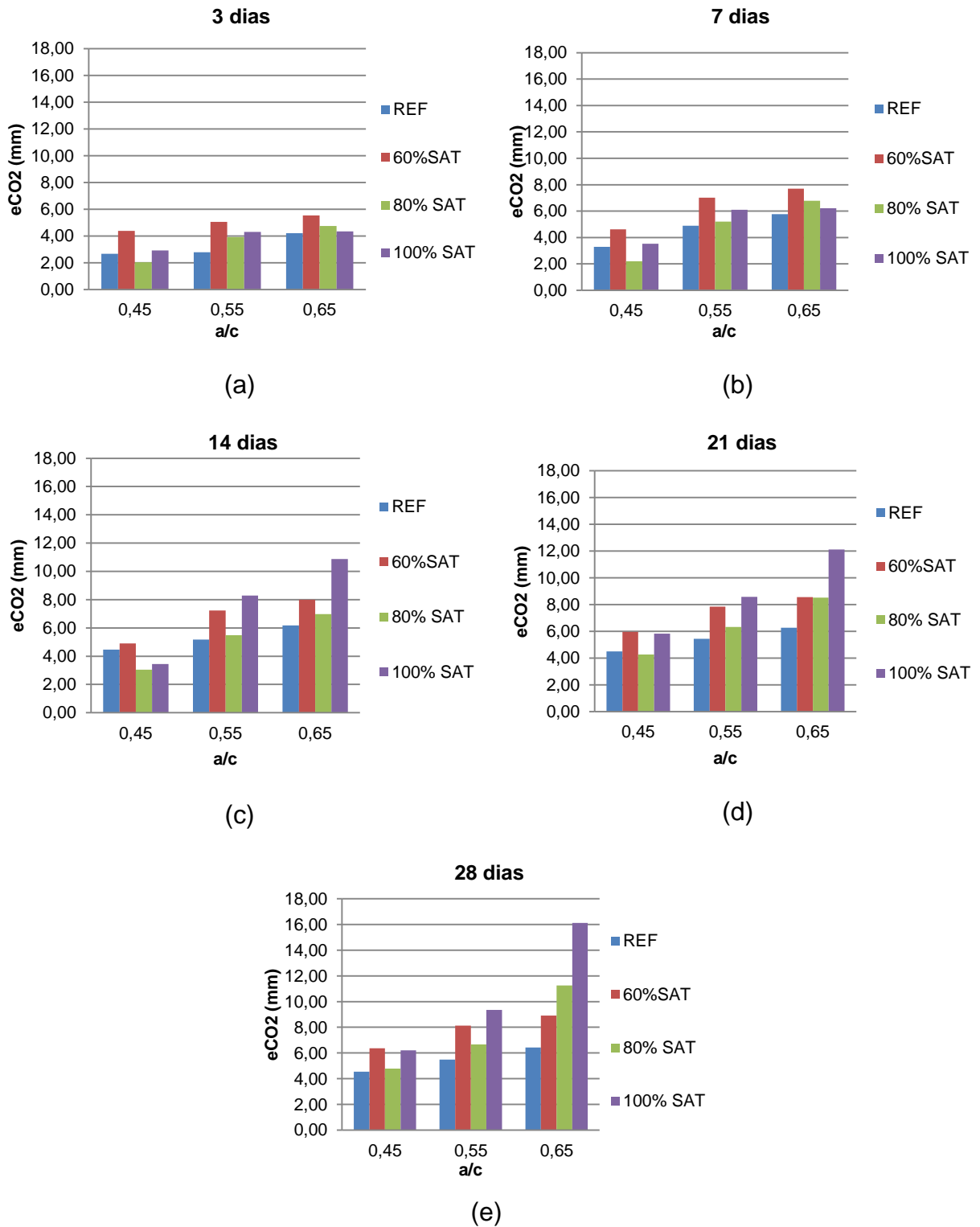


FIGURA 26 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO AOS 3 (A), 7 (B) , 14 (C), 21 (D) E 28 (E) DIAS EM FUNÇÃO DOS FATORES ÁGUA CIMENTO PARA CADA TIPO DE MISTURA.

De acordo com estes dados, nota-se que todas as misturas com 60% AGRC saturados indicaram maiores profundidades de carbonatação aos 3 dias. Comparando com as demais misturas esta situação foi mais evidente quando era menor o fator água/cimento. Aos 7 dias todas as misturas com AGRC 60% ainda apresentavam as maiores profundidades de carbonatação, no entanto houve uma maior aproximação no avanço da frente carbonatada das outras misturas em relação ao 3º dia. Aos 14 dias observou-se que a frente de carbonatação foi maior nos concretos que continham AGRC 100% saturados para os fatores a/c de 0,55 e 0,65. Na data de 21 dias, o comportamento dos concretos manteve-se praticamente o mesmo, salvo a desaceleração do processo observado nas misturas referência. Na última data, nos concretos referência, a frente de carbonatação praticamente não avançou. Por outro lado, para todas as misturas que continham AGRC, observou-se uma maior tendência à continuidade do fenômeno carbonatação conforme maior o fator a/c e a taxa de saturação.

Contudo, nesta dissertação foram observados resultados diferentes de Levy (2001) ao utilizar AGRC. Este autor em todas suas misturas observou menores profundidades de carbonatação tanto para aquelas que continham agregados graúdos cerâmicos quanto agregados graúdos de concreto. Fato que pode ser explicado por diversos fatores que vão desde as características do agregado reciclado à britagem e procedimentos de mistura. Além disso, os agregados graúdos cerâmicos utilizados por este autor se diferenciavam dos aqui utilizados, pois continham considerável quantidade de argamassa aderida, ou seja, não eram puramente cerâmicos como os presentes nas misturas desta dissertação, o que influenciaria diretamente na velocidade e capacidade de difusão de CO₂ no concreto. Pode-se dizer ainda que a argamassa serviu como agente obturador de parte dos poros superficiais dos agregados graúdos reciclados. Vale ressaltar que este autor também não usou qualquer tipo de pré-saturação.

Quanto a relação água/cimento, observa-se no gráfico 22 que para todos os tipos de mistura quanto maior era a relação água/cimento adotada maior foi o coeficiente ou a profundidade de carbonatação. O mesmo fato observado por Levy (2001), Alves (2007), Robles (2007), Amorim (2008) e Werle (2010) em misturas com agregados graúdos reciclados de concreto, independente da adoção ou não da pré-molhagem. Assim leva-se a crer que independente do tipo de AGR e a utilização

ou não de alguma técnica de pré-molhagem, o incremento do fator a/c aumenta a profundidade de carbonatação do concreto.

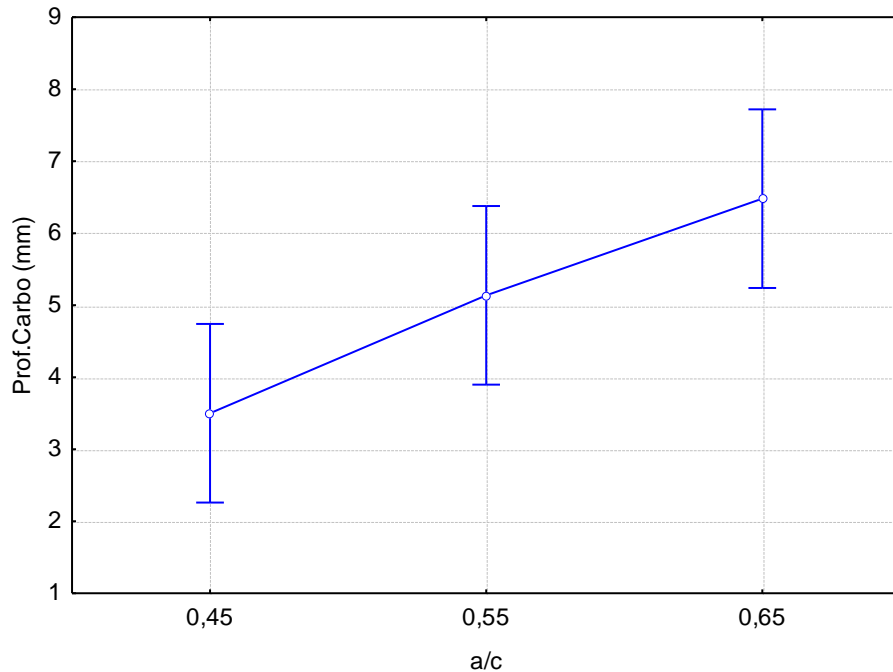


GRÁFICO 22 - EFEITO DA VARIÁVEL "FATOR A/C" NA PROFUNDIDADE CARBONATAÇÃO

Observando os gráficos 23 e 24, nota-se que nas misturas referência o aumento da relação água cimento (dentro dos limites estipulados nesta pesquisa) em 0,10 correspondeu a um acréscimo de aproximadamente 21% no coeficiente de carbonatação. Para a mistura com AGCR 60% saturado, ao se aumentar o fator a/c de 0,45 para 0,55 o coeficiente de carbonatação aumentou 34,2% e de 0,55 para 0,65 o aumento foi de 9,5%. A mistura 80% saturada quando o fator a/c de 0,45 foi aumentado para 0,55 o coeficiente de carbonatação subiu 35%, e de 0,55 para 0,65 houve um aumento de 59%. Os maiores aumentos de coeficiente ocorreram nas misturas 100% saturadas, nas quais do fator a/c de 0,45 para 0,55 e deste último para 0,65, observou-se um aumento de 59,5% e 68% respectivamente.

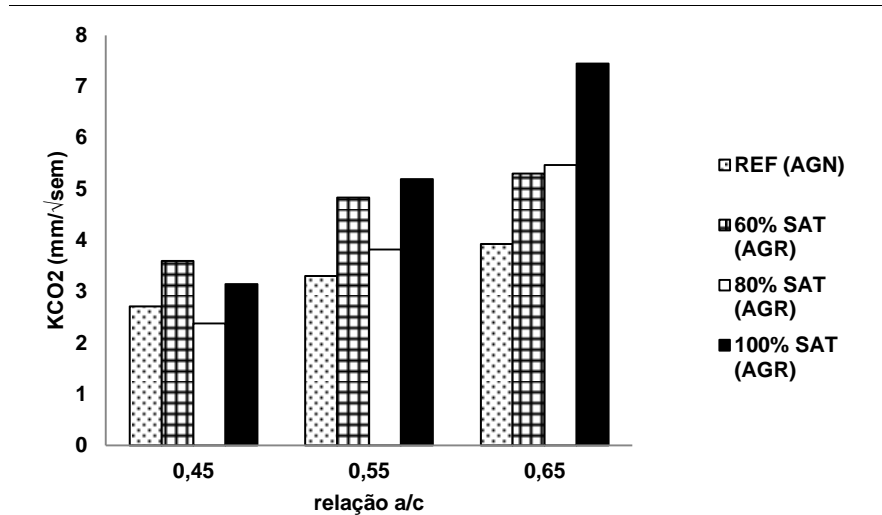


GRÁFICO 23 - KCO2 EM FUNÇÃO DO FATOR A/C PARA CADA MISTURA.

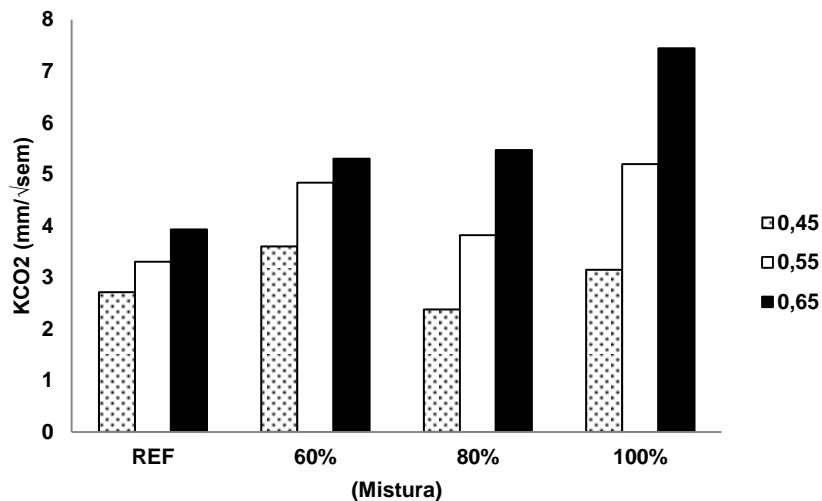


GRÁFICO 24 - KCO2 EM FUNÇÃO DO TIPO DE MISTURA PARA CADA FATOR A/C

Durante os ensaios uma análise visual (figura 27) já esclarecia parte do comportamento observado nas misturas que continham AGRC. A partir do 7º dia foi notada a presença de uma frente de carbonatação ao redor dos agregados graúdos cerâmicos. A incidência não foi bem definida dentre as misturas, pois não ocorriam de forma isolada, no entanto observou-se a ocorrência desta situação com maior intensidade nas misturas com AGRC 100% saturados.



FIGURA 27 - AVANÇO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO ATRAVÉS DE AGREGADOS DE ORIGEM CERÂMICA.

Conclui-se então que a porosidade característica de AGRC funcionou como uma “via livre” para o avanço do CO₂ nos concretos, principalmente naqueles onde havia menor aderência na interface entre AGRC e a pasta. Indo mais além pode-se afirmar que como a porosidade do AGRC é maior que a da matriz, constatando-se que na pasta o avanço da frente de carbonatação era mais lenta, enquanto o AGRC liberava o caminho livre das reações que pudessem consumir o CO₂ facilitando a difusão do gás dentro do concreto acelerando o avanço da frente de carbonatação.

Werle (2010), ao analisar misturas produzidas com agregados reciclados de concretos com resistências de 18 a 50 MPa, notou que quanto menor era a resistência e maior porosidade do AGR havia um maior avanço da frente de carbonatação. Embora os tipos de agregados e os procedimentos de carbonatação utilizados nesta dissertação tenham sido diferentes da autora anteriormente citada, a equivalência dos mecanismos é válida quando se observou que em ambas as pesquisas a difusão do CO₂ no concreto ocorreu em maior intensidade quando a porosidade do agregado reciclado é maior que a da matriz de concreto.

É importante ressaltar que os coeficientes de carbonatação e a difusão de CO₂ estão relacionados aos mesmos fatores de absorção de água do concreto e a alta porosidade do agregado reciclado (Amorim 2008). Assim, não foi diferente nas misturas desta dissertação, nas quais aquelas que continham AGRC apresentaram maiores absorções de água e maiores profundidades de carbonatação.

5.2.4 Penetração acelerada de íons cloreto.

Embora a penetração de cloretos tenha sua capacidade influenciada pelo tipo de mecanismo e condições ambientes, é importante ressaltar que os dados obtidos nesta dissertação se limitam a suprir os estudos sobre durabilidade do concreto no que diz respeito penetrabilidade de íons em concretos contendo agregados de origem cerâmica.

Os resultados obtidos ao longo de 6 horas de ensaio deram origem às cargas totais passantes para cada tipo de mistura. Os números da tabela 23 representam as cargas totais passantes em coulombs (Q) representados pela média de 3 corpos de prova ensaiados para cada idade.

TABELA 23 - VALORES DE CARGA "Q" EM COULOMBS PARA TODAS AS MISTURAS E FATORES A/C.

Mistura	28 dias			63 dias		
	0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	0,65
Referência	4433	5084	5869	3767	4327	5180
AGRC 60% Saturado	6340	7716	9081	6120	6932	8262
AGRC 80% Saturado	5930	6832	8514,7	5502	6478	8320
AGRC 100% Saturado	8190	9217	13082	7760	8681	12029

5.2.4.1 Influência da presença do AGRC na penetração de cloretos acelerada

A análise de variância ANOVA quanto à porcentagem de substituição de agregado natural pelo AGRC consta na tabela 24.

TABELA 24 - ANOVA PARA O A PRESENÇA DO AGRC X PENETRAÇÃO DE CLORETOS ACELERADA

Efeito	ss	DF	MS	F	p
Teor de AGRC	1,450515E+08	1	1,450515E+08	43,1048	0,000000
Erro	2,355565E+08	70	3,365093E+06		

A partir da análise de variância leva-se a concluir que esta variável é significativa a um nível de confiança de 99% pois o valor de “p” foi menor que 0,01.

Para uma melhor visualização dos resultados, na tabela 25 encontram-se os valores proporcionais das misturas que continham agregados reciclados cerâmicos em relação às misturas referência.

TABELA 25 - RELAÇÃO ENTRE CONCRETOS REFERENCIA E CONCRETOS CONTENDO AGRC SATURADOS.

Mistura	28 dias			63 dias		
	0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	0,65
Referência	1	1	1	1	1	1
AGRC 60% Saturado	1,43	1,52	1,55	1,62	1,60	1,59
AGRC 80% Saturado	1,34	1,34	1,45	1,46	1,50	1,61
AGRC 100% Saturado	1,85	1,81	2,23	2,06	2,01	2,32

A partir de uma análise geral sobre os resultados de carga passante, ao se comparar com os limites de risco estabelecidos pela ASTM C1202, notou-se que todos os concretos que continham AGRC, independentemente da taxa de saturação, elevam bastante o risco de penetração de íons cloretos, considerado alto em comparação com os concretos referência que predominantemente situaram-se na faixa de risco moderado.

5.2.4.2 Influência da idade, taxa de saturação e fator a/c na penetração de cloretos acelerada.

A fim de avaliar as variáveis presentes nas misturas com AGRC, foi feita uma análise de variância ANOVA para que se pudesse observar quais os níveis de significância de cada uma em relação à carga passante em Coulombs. Na tabela 26 constam os resultados da ANOVA para as variáveis “idade”, “taxa de saturação” o e “a água/cimento”.

TABELA 26 - ANOVA DAS VARIÁVEIS ANALISADAS NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM AGRC.

Efeito	ss	DF	MS	F	p
Idade	3,867248E+06	1	3,867248E+06	5,113	0,028324
Taxa de saturação	8,681264E+07	2	4,340632E+07	57,383	0,000000
Fator a/c	9,911133E+07	2	4,955567E+07	65,513	0,000000
Erro	3,630842E+07	48	7,564255E+05		

A partir da análise de variância da tabela 26, nota-se que as variáveis “taxa de saturação” e “fator a/c” apresentam uma forte significância enquanto que a variável “Idade”, embora tenha se mostrado significativa, tem menor influência nas misturas com AGRC. A influência dos efeitos de cada variável consta nos gráficos 25, 26 e 29.

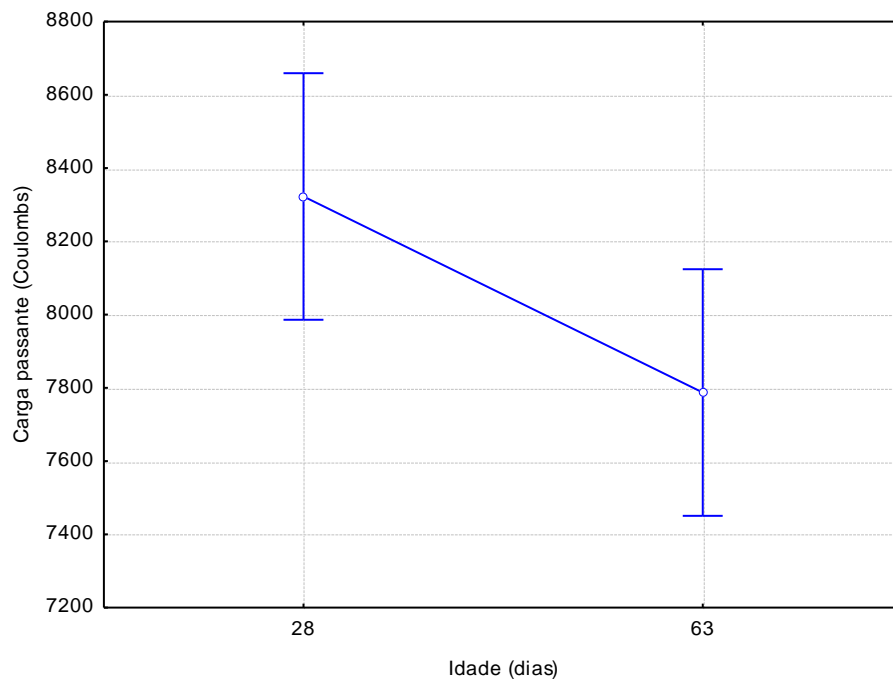


GRÁFICO 25 - EFEITO DA VARIÁVEL “IDADE” NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS.

Ao atentar para o gráfico 25, observa-se um comportamento, embora pouco significativo, no qual todas as misturas em média apresentaram uma menor carga passante na idade de 63 dias em relação à idade de 28 dias sem grandes alterações na ordem do efeito nas misturas.

Quanto à taxa de saturação, todas as misturas que continham AGRC apresentaram maiores cargas passantes em relação às misturas referência. Dentre

estas, a maior capacidade de penetração de íons cloretos foi observada nas misturas que continham AGRC 100% saturados, enquanto que as menores foram notadas nas misturas com AGRC 80% saturados como pode ser observado no gráfico 26.

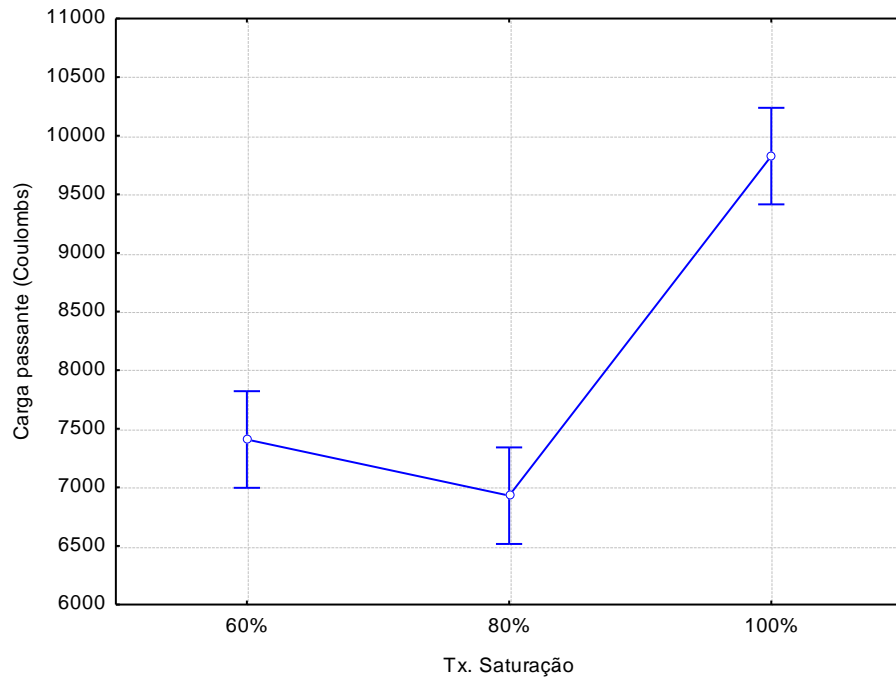


GRÁFICO 26 - EFEITO DA VARIÁVEL "TAXA DE SATURAÇÃO" NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS.

Aos 28 dias os concretos que mais se aproximaram do comportamento da mistura referência foram os que continham AGCR 60% e 80% saturados, principalmente para o menor fator a/c. Conforme o fator a/c cresceu a penetração de íons cloretos aumentou de 43% a 55% para concretos contendo AGCR 60% saturados. Para as misturas contendo AGRC 80% saturados, observaram-se as menores diferenças em relação aos concretos referência, que variaram de 34% a 45% conforme maior o fator a/c.

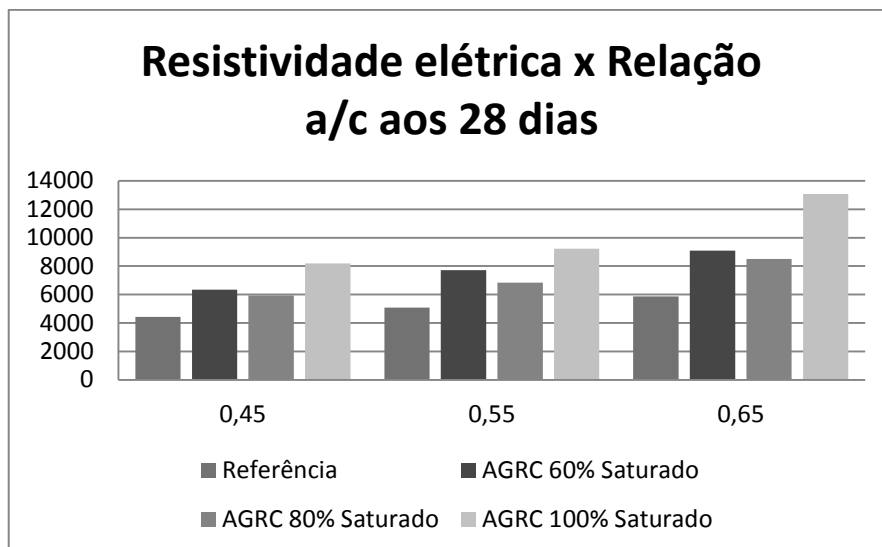


GRÁFICO 27 - CARGA PASSANT EM COULOMBS PARA TODAS AS MISTURAS EM FUNÇÃO DO FATOR A/C AOS 28 DIAS

Nota-se no gráfico 27 que as misturas com AGRC 100% saturados aos 28 dias, apresentaram maior carga total passante para todos os concretos e também para todos os fatores a/c adotados, onde as maiores diferenças foram respectivamente um acréscimo de 85% e 123% para o menor e maior fatores a/c utilizados nas misturas com AGRC 100% saturados em relação ao concreto referência.

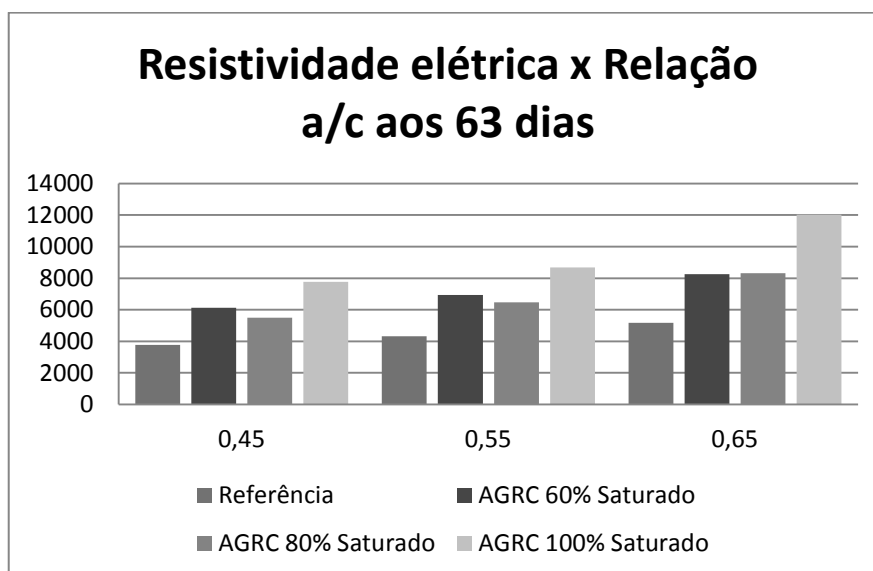


GRÁFICO 28 - CARGA PASSANTE EM COULOMBS PARA TODAS AS MISTURAS EM FUNÇÃO DO FATOR A/C AOS 63 DIAS

Aos 63 dias, pode-se observar no gráfico 28 que as misturas que continham AGRC 80% e 60% pré-saturados 100% de AGRC continuaram apresentando maior

carga passante em intensidades 106% e 132% para os fatores a/c de 0,45 e 0,65 respectivamente em relação às misturas referência.

A partir desta análise, é importante ressaltar, que assim como a variável “taxa de saturação”, o “fator água/cimento” também foi bastante significativo para a avaliação da penetração de cloretos, ficando evidente no gráfico 29.

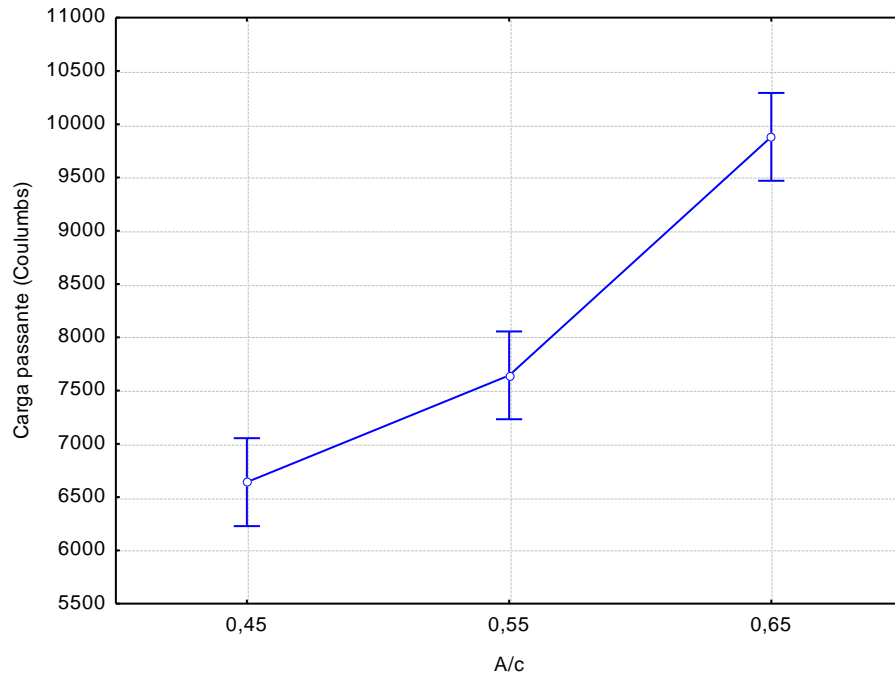


GRÁFICO 29 - EFEITO DA VARIÁVEL “FATOR ÁGUA/CIMENTO” NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS.

Ao se adotar maiores fatores água/cimento, a carga passante observada foi maior, independentemente da taxa de pré-saturação dos AGRC. Fato também constatado por Levy (2001) que ao trabalhar com agregados de concreto e alvenaria, afirmou que a penetração de íons cloretos esta diretamente ligada ao fator a/c da mistura; que quanto maior for o fator a/c capacidade de penetração de íons é maior.

Na presente pesquisa todas as misturas se comportaram de acordo com o autor citado sendo que a maior influencia do fator a/c foi dada quando este foi de 0,65 nas misturas que continham AGRC saturados.

Ainda a respeito da relação água/cimento, Poon e Kou (2006) afirmam que a diminuição deste fator tende a produzir concretos com matrizes mais densas, de menor permeabilidade e porosidade, fato que aumenta a resistência à penetração de cloretos. No entanto nesta pesquisa ficou evidente uma tendência, independente da

idade da mistura, a uma menor influência do fator a/c quanto maior foi o teor de pré-molhagem do AGRC utilizado.

Troian (2010), também observou em misturas que continham agregados graúdos de concreto, que quanto maior foi a relação água/cimento da matriz do concreto, maior foi a carga passante. Ainda para esta autora, a mesma observou um aumento médio de 90,15% na carga passante em misturas com agregados de concreto de baixa resistência.

Dentre os valores desta pesquisa obteve-se um aumento médio de até 113% para misturas que continham AGRC 100% saturados. A diferença entre os valores é aceitável e coerente, pois mesmo com a presença do agregado de concreto de baixa resistência, este provavelmente terá uma estrutura menos porosa que a do agregado cerâmico utilizado nesta dissertação, fato que certamente elevou a permeabilidade e capacidade de penetração de cloretos das misturas da presente pesquisa.

5.2.5 Resistividade elétrica

No ensaio de resistividade elétrica utilizaram-se corpos de prova ensaiados em condições diferentes daquelas observadas nos outros ensaios analisados. Hunkeler (1996) citado por Levy (2001) coloca a umidade como fator que pode reduzir a resistividade do concreto indicando assim uma situação de maior risco para início da corrosão. Sabendo-se que este seria um fator limitante optou-se por medir a resistividade em corpos de prova logo após retirada da câmara úmida que para nível de durabilidade seria uma situação crítica em relação aos outros ensaios. Na tabela 27 constam os resultados da média de 3 medidas feitas em cada corpo de prova submetido ao ensaio de resistividade aos 28 e 63 dias.

TABELA 27 - VALORES MÉDIOS DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A RESISTIVIDADE.

Mistura	28 dias			63 dias		
	0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	0,65
Referência	32928	29631	21227	46379	38580	28155
AGRC 60% Saturado	28394	25400	19839	36455	34180	29332
AGRC 80% Saturado	27434	24488	15971	40448	34308	21030
AGRC 100% Saturado	11858	10997	6753	11858	15051	8036

5.2.5.1 Influência da presença do AGRC na resistividade elétrica

A análise de variância ANOVA quanto à porcentagem de substituição de agregado natural pelo AGRC consta na tabela 28.

TABELA 28 - ANOVA PARA O A PRESENÇA DO AGRC X PENETRAÇÃO DE CLORETOS ACELERADA

Efeito	ss	DF	MS	F	p
Teor de AGRC	9,908982E+08	1	9,908982E+08	9,8154	0,003009
Erro	4,643839E+09	46	1,009530E+08		

A ANOVA resultou em um valor de “p” de 0,003, o que se leva a concluir que a presença do AGRC é significativa ao estudo da resistividade elétrica quando há presença de AGRC. As misturas que continham agregados reciclados cerâmicos apresentaram em média menores valores de resistividade, conforme notado no gráfico 30.

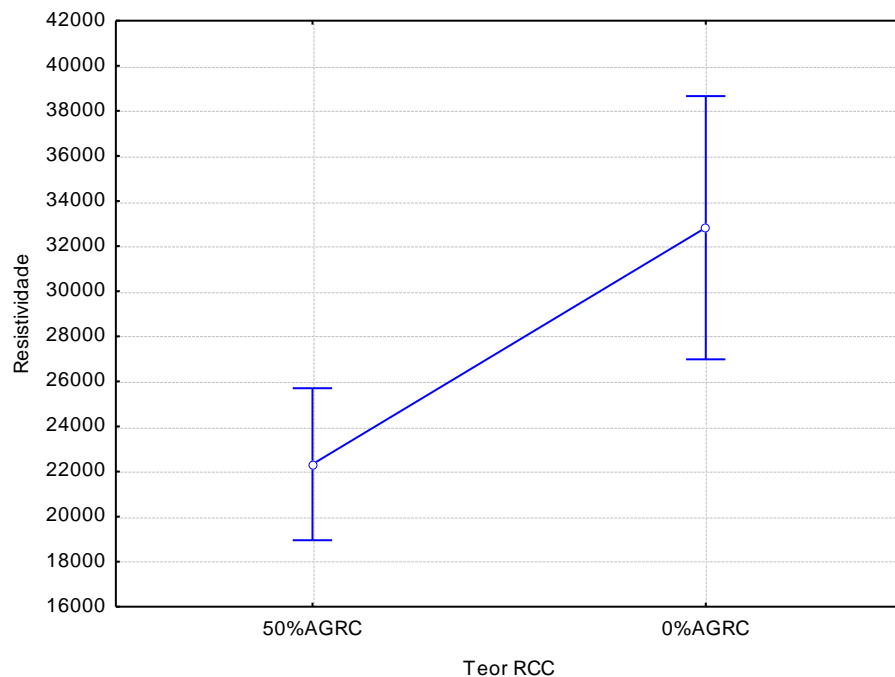


GRÁFICO 30 - EFEITO DO TEOR DE AGRC X RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A utilização do AGRC promoveu uma queda nos valores de resistividade elétrica, podendo-se afirmar a partir da análise desses resultados, que a resistividade elétrica além de ser uma propriedade diretamente relacionada com a porosidade da microestrutura da pasta cimentícia (Polder, 2002), com o acréscimo de AGRC há um aumento na quantidade de poros do sistema diminuindo assim a resistividade nestas misturas em comparação aos concretos referência. Assim, achou-se importante avaliar a influência de cada variável presente neste tipo de mistura.

5.2.5.2 Influência da idade, taxa de saturação e fator a/c na resistividade elétrica.

A fim de avaliar as variáveis presentes nas misturas com AGRC, também foi feita uma análise de variância ANOVA para que se pudesse observar quais os níveis de significância de cada uma em relação à resistividade elétrica. Na tabela 29 constam os resultados da ANOVA para as variáveis “idade”, “taxa de saturação” e “relação água/cimento”.

TABELA 29 - ANOVA DAS VARIÁVEIS ANALISADAS NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETOS COM AGRC.

Efeito	ss	DF	MS	F	p
Idade	3,942139E+08	1	3,942139E+08	24,886	0,000024
Taxa de saturação	2,424008E+09	2	1,212004E+09	76,511	0,000000
Fator a/c	5,679844E+08	2	2,839922E+08	17,928	0,000008
Erro	4,752251E+08	30	1,584084E+07		

A partir da análise de variância da tabela 29, as três variáveis analisadas nas misturas com AGRC apresentam forte significância. A influência dos efeitos de cada variável consta nos gráficos 31, 32 e 33.

Como pode ser observado no gráfico 31, quanto maior foi a taxa de pré-saturação dos agregados cerâmicos, menor foram os valores de resistividade obtidos. As misturas com AGRC 60% e 80% saturados situaram-se numa faixa entre 25000 e 30000 ($\Omega \cdot \text{cm}$) apresentando comportamentos semelhantes.

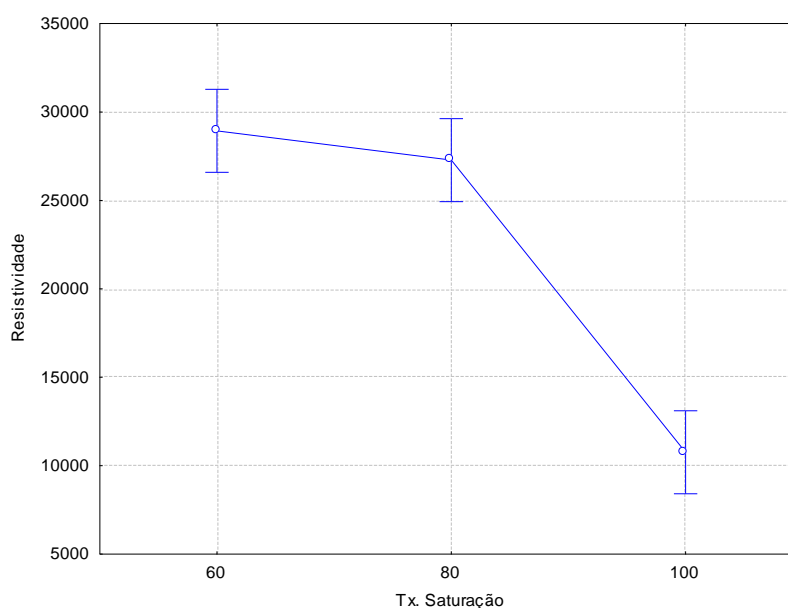


GRÁFICO 31 - EFEITO DA TAXA DE SATURAÇÃO DO AGRC X RESISTIVIDADE ELÉTRICA

O gráfico 32 mostra que o avanço da idade influenciou em um aumento nos valores de resistividade elétrica das misturas com AGRC. Em média, o avanço da idade dos 28 aos 63 dias influenciou em um acréscimo de 74,5% nos valores de resistividade obtidos.

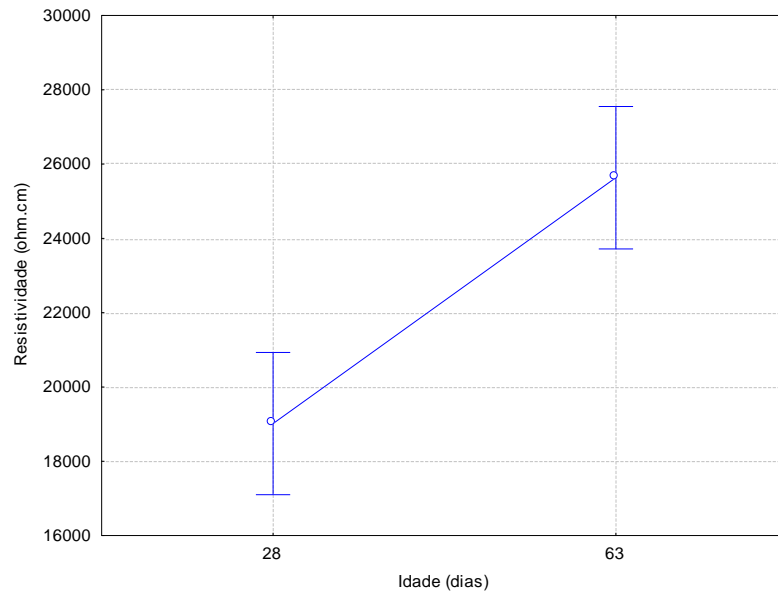


GRÁFICO 32 - EFEITO DA IDADE X RESISTIVIDADE ELÉTRICA

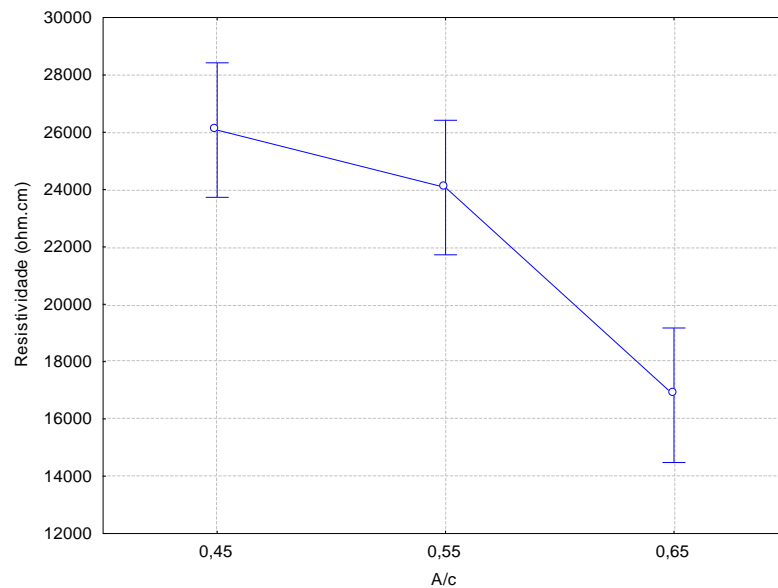


GRÁFICO 33 - EFEITO DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO X RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Quanto ao fator água/cimento (gráfico 33), como já era esperado, esta foi uma variável que atuou de forma inversamente proporcional à resistividade elétrica. Os concretos com AGRC apresentaram diferenças médias de até 65,3% quando alterado o fator água/cimento, independentemente das outras variáveis.

Fazendo uma comparação entre as misturas com AGRC e as misturas referência, aos 28 dias todas seguiram a mesma linha de comportamento esperado

para valores de resistividade, o aumento do fator a/c, independentemente do tipo de mistura, diminuiu a resistividade dos concretos como se pode observar no gráfico 34, observando-se menores valores de resistividade elétrica quando na mistura haviam agregados reciclados 100% saturados.

Também para a idade de 28 dias, as misturas contendo AGRC 60% saturados foram observados valores de resistividade elétrica de 14%, 15% e 7% menores respectivamente para os fatores a/c de 0,45, 0,55 e 0,65 em relação aos concretos referência. Para as misturas com AGRC 80% saturados, para o fator a/c de 0,45 o decréscimo de resistividade foi de 17%, para o fator a/c de 0,55 foi de 18% e para fator 0,65 a resistividade elétrica decresceu 25%. Nos resultados obtidos para os concretos com AGRC 100% saturados, foram observadas quedas de 64%, 63% e 69% para os fatores a/c de 0,45, 0,55 e 0,65 respectivamente quando comparados às misturas referência.

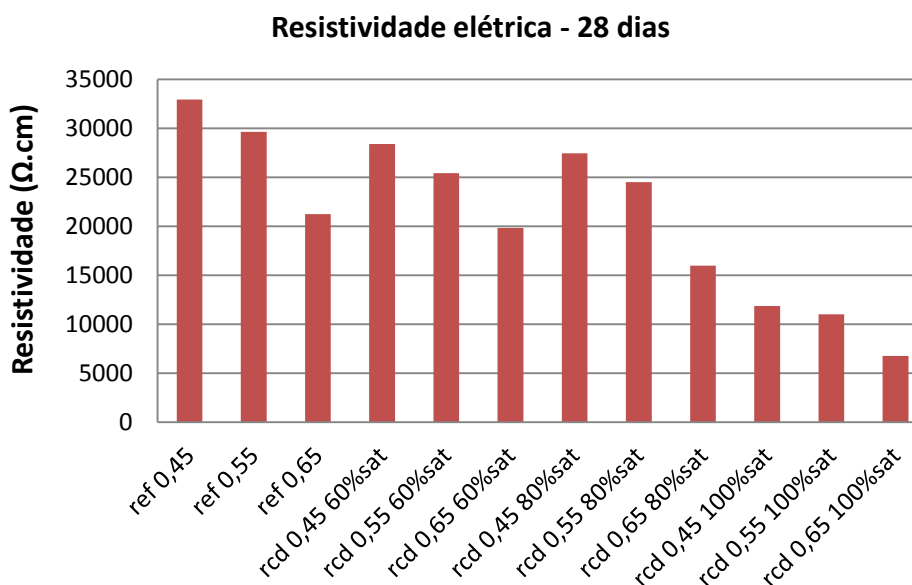


GRÁFICO 34 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA X TIPO DA MISTURA PARA 28 DIAS

Com o avanço da idade até 63 dias (gráfico 35) os concretos com AGRC 100% saturados obtiveram pouca diferença quanto aos resultados obtidos aos 28 dias em comparação as misturas referência, salvo o resultado para relação a/c de 0,45 a qual a diferença diminuiu 10% quando comparado a sua mistura referência em relação aos resultados da primeira data.

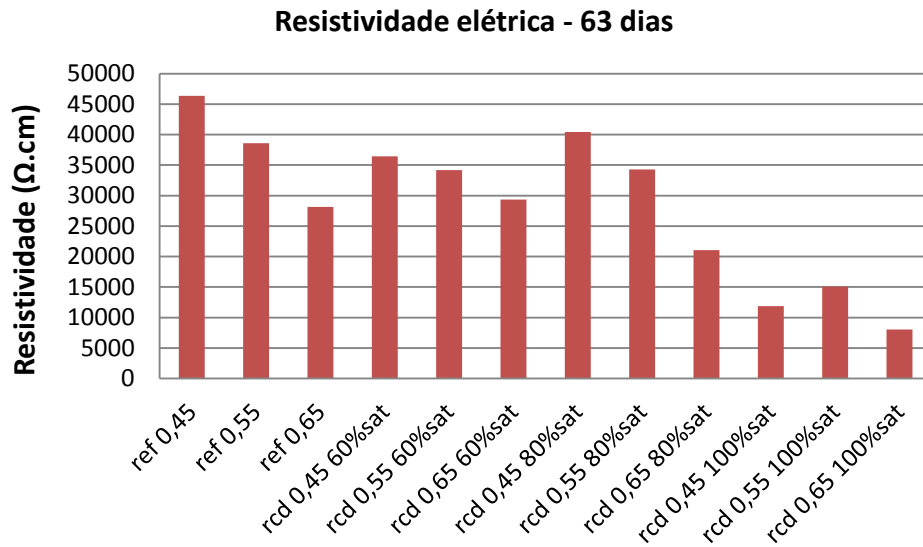


GRÁFICO 35 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA X TIPO DA MISTURA PARA 63 DIAS

No entanto, com o avanço da idade, os resultados para as misturas com agregados saturados 60% e 80% comportaram-se de maneira diferente do esperado nas três relações a/c. Aos 28 dias, para o fator a/c de 0,45, o menor decréscimo de resistividade havia ocorrido para a mistura com AGRC 60%, fato que se inverteu aos 63 dias quando o menor decréscimo em relação à mistura referência ocorreu no concreto produzido com AGRC 89% saturados.

Este fato pode ser explicado pela relação entre a resistividade e a hidratação da pasta que ocorre de forma mais rápida em concretos com baixas relações a/c, na qual a medida que a pasta hidrata há uma diminuição na porosidade do concreto e conseqüentemente uma diminuição na quantidade do eletrólito aumentando a resistividade elétrica do sistema. No caso das duas misturas citadas anteriormente, a alta porosidade do agregado e a taxa de saturação podem explicar os resultados obtidos.

Quando se leva em consideração que aos 28 dias havia uma maior aderência existente entre pasta e agregados 60% saturados em relação aos 80% saturados, conclui-se que havia um sistema com poros com maior conectividade na interface agregado/pasta nas misturas com a maior taxa de saturação fazendo com que estas tivessem menor resistividade.

No entanto na idade de 63 dias isto se inverteu tanto por conta da diminuição da conectividade dos poros nos concretos que continham AGRC 80% saturados e um provável processo de hidratação interna já citada anteriormente na análise das propriedades mecânicas que pode ter ajudado e incrementado o processo de hidratação da pasta nestas misturas.

Pode-se também citar o fenômeno da colmatação observado por Vieira (2008), onde a autora notou que corpos de prova que retornavam a câmara úmida mantinham o processo de hidratação dos compostos ainda não hidratados. Assim as partículas de água do ambiente de cura podem ter sido responsáveis pela inversão de comportamento aos 63 dias.

Santos (2006) cita em seu trabalho que a quantidade água evaporável é variável conforme o tempo de hidratação do cimento, e como a resistividade esta ligada ao movimento de íons livres nesta água, isto pode confirmar que de certa forma a água presente nos poros do AGRC 80% saturados, pode ter sido liberada nas primeiras idades influenciando num processo contínuo de hidratação e uma menor da resistividade.

Já nos concretos com AGRC 60% saturados estes mecanismos também devem ocorrer, mas em menor intensidade devido a menor quantidade de água evaporável presa nos agregados, além de uma probabilidade da maior quantidade de agregados cerâmicos secos ter absorvido parte da água com função de hidratação fato que na maior idade desacelerou este processo em relação a mistura citada anteriormente.

Ou seja, nas primeiras idades a porosidade do agregado e a sua taxa de saturação aparentam ser decisivos na porosidade e conseqüentemente nos valores de resistividade, no entanto para maiores idades de hidratação, a densificação da pasta e a menor continuidade dos poros passam a ser o fator predominante na resistividade elétrica nos concretos estudados.

No que diz respeito à comparação de dados, a escassa quantidade de trabalhos envolvendo resistividade elétrica e AGR dificultou comparações mais precisas. Contudo os dados obtidos nesta dissertação concordam com a observação feita por Levy (2001) que ao realizar ensaios de resistividade em corpos de prova contendo AGRC, o mesmo concluiu que há uma diminuição resistividade elétrica nestas misturas. Embora as condições de ensaio deste autor tenham sido diferentes,

a equivalência entre os resultados é válida, pois se observou o mesmo comportamento na presente dissertação.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

No atual panorama das pesquisas a respeito da utilização de agregados reciclados na aplicação em concretos ainda existem lacunas e resultados bastante adversos principalmente no que diz respeito à durabilidade. Resultados e análises de ensaios de penetração de cloretos e resistividade ainda são escassos principalmente quando agregado utilizado é de origem cerâmica.

O mesmo pode-se falar sobre abordagem a respeito da taxa de saturação. Não existe na bibliografia uma técnica de saturação bem definida pelos diversos autores que abordam a temática da utilização de agregados reciclados. A partir dos dados obtidos e analisados, foram tecidos alguns comentários, considerações e conclusões sobre esta pesquisa.

6.2 CONCLUSÕES SOBRE OS RESULTADOS

Tendo em vista que foram alcançados os objetivos de avaliar o comportamento de concretos com agregados reciclados cerâmicos pré-saturados com diferentes taxas, relações água/cimento e idades, teceu-se a partir dos dados obtidos nesta dissertação algumas conclusões sobre esta pesquisa.

- Para o **concreto no estado fresco** observou-se na avaliação da **trabalhabilidade** que a taxa de saturação do agregado reciclado cerâmico pode desenvolver maior ou menor trabalhabilidade dependendo da porcentagem de agregados saturados na mistura.
 - Quanto à **taxa de saturação**, as misturas com AGRC 60% saturados promoveram menor abatimento nos concretos em relação à mistura referência. A utilização de agregados 100% saturados influenciaram em um maior abatimento e maior quantidade de água livre na pasta fresca. Nas misturas que continham AGRC 80% saturados foram encontrados os valores de abatimento mais próximos dos concretos referência.

- **A técnica de pré-saturar** agregados reciclados mostrou-se viável e capaz de suprir a perda de trabalhabilidade característica da utilização de AGR principalmente quando mais porosos.

- Para concreto no **estado endurecido**, na **resistência à compressão simples** observou-se que a nível mecânico que diversos fatores podem ter influenciado nos resultados obtidos, mas incisivamente devido às características do agregado cerâmico. Dentre estes pode-se citar a alta porosidade do AGRC e a baixa resistência mecânica das cerâmicas que pode ainda ter sido menor em função da técnica de britagem que provavelmente micro fissurou o agregado. A nível de esclarecimento, as características citadas influenciam diretamente nos mecanismos de aderência do agregado com a pasta, quando há presença de agregados secos, ou seja, com poros livres. Desta forma, permitiram uma melhor aderência pasta/agregado e promoveram melhores resistências para concretos com AGRC parcialmente saturados que para concretos com AGRC totalmente saturados. No entanto maiores quantidades de agregados secos podem absorver parte da água de hidratação, diminuindo as resistências encontradas, ou mesmo que estejam bem aderidos a pasta, devido a baixa resistência do agregado cerâmico, quando o mesmo for solicitado este também tende a diminuir a resistência do sistema. Os melhores resultados e mais próximos das misturas referência foram observados naquelas que continham AGRC 80% saturados, principalmente para as menores relações água/cimento. Este comportamento pode ser decorrente de uma possível cura interna nas misturas com AGRC. Contudo este mecanismo de cura ainda necessita de maior enfoque para que a influência do mesmo seja dimensionada com maior certeza.

- Em relação à **absorção de água por capilaridade**, após a análise dos resultados experimentais e avaliação estatística das variáveis, concluiu-se que:

-
- Quanto à **relação água/cimento**, a mesma apresentou influência significativa em todas as misturas, as quais seguiram a linha coerente e esperada; maiores relações água/cimento tendem a produzir concretos de maior porosidade e maiores valores de absorção.
 - A **idade** de hidratação também apresentou influência em todas os concretos produzidos. Foi constatado o comportamento esperado em independente do tipo de mistura; com o avanço dos 28 para os 63 dias, todas apresentaram uma diminuição na absorção de água por capilaridade.
 - No que diz respeito à **taxa de saturação** dos AGRC, a mesma mostrou-se estatisticamente significativa em todas as misturas. A presença do AGRC pré-saturado fez com que este tipo de mistura absorvesse até 68% mais água em relação às misturas referência. A saturação total dos AGRC promoveu uma maior continuidade dos poros no concreto ocasionada pela interação do fator a/c e a água aprisionada no AGRC, quanto maior foi a relação água/cimento utilizada na mistura. A penetrabilidade da água foi maior quando os poros dos agregados apresentavam maior conectividade, fato observado nos concretos com AGRC 100% saturados. Quando os agregados cerâmicos estavam parcialmente saturados os valores mais próximos das misturas referência ocorreram para aqueles 80% saturados.
- Em relação à **carbonatação acelerada**, após a análise dos resultados experimentais e avaliação estatística das variáveis, concluiu-se que:
- Quanto ao **tipo da mistura** foi comprovado por dados estatísticos e avaliações visuais a nível macroscópico, que a profundidade e o coeficiente de carbonatação foram maiores em concretos com AGRC em comparação a concretos convencionais.
 - Quanto à **taxa de saturação**, esta apresentou forte significância e sua maior influencia ocorreu quando esta foi de 100%,fato que leva-se a crer que nestas misturas as zonas de transição eram menos densas e

- o mecanismo de aderência agregado/pasta era praticamente inexistente, favorecendo a alta conectividade dos poros da argamassa com os dos agregados cerâmicos, o que aumenta a permeabilidade e porosidade do sistema.
- A relação **água/cimento** apresentou-se significativa em todas as misturas, obedecendo ao comportamento que se esperava: Quanto mais água livre na mistura, maior a profundidade de carbonatação observada.
 - Com base nos dados obtidos nas diferentes **idades**, os mesmos apresentaram valores coerentes aos esperados; com o avanço das idades todas as misturas apresentaram maiores profundidades de carbonatação, com maiores valores observados principalmente a partir dos 14 dias.
 - Pode-se concluir então que: Quando agregados reciclados de alta porosidade são inseridos em uma matriz cimentícia, a carbonatação tem sua intensidade relacionada com a porosidade da matriz, do agregado reciclado e a taxa de saturação.
- Em relação à **penetração acelerada de íons cloretos**, após a análise dos resultados experimentais e avaliação estatística das variáveis, concluiu-se que:
- Quanto a **presença do AGRC**, o mesmo mostrou-se de grande influência, pois para todas as misturas que continham estes agregados foram observados maiores cargas passantes em relação aos concretos referência.
 - Para os níveis de **taxa de saturação**, notaram-se resultados semelhantes estatisticamente para as duas misturas com agregados parcialmente saturados com uma média de carga passante para a taxa de saturação de 80%.
 - A variável **idade** apresentou-se estatisticamente significativa; dos 28 aos 63, como já era esperado, houve uma redução nas cargas passantes em todas misturas avaliadas, no entanto para esta última

data, as misturas com AGRC 60% e 80% saturados tenderam a aproximar seus comportamentos quanto a penetrabilidade de íons cloretos.

- Analisando a variável relação **água/cimento**, quanto maior foi seu valor, maior também foi o valor da carga passante. Para a relação de 0,65 foram observados os maiores valores de carga passante aos 28 dias. Aos 63 dias, para esta mesma relação água/cimento foi observando um comportamento bem semelhante entre as misturas com agregados 60% e 80% saturados.
- Em relação à **resistividade elétrica**, após a análise dos resultados experimentais e avaliação estatística das variáveis, concluiu-se que:
- A **presença do AGRC** foi de elevada significância nos resultados de resistividade elétrica obtidos. Para todas as misturas que continham AGRC, foi observado um maior risco ao início de corrosão devido os menores valores de resistividade em relação às misturas referência.
 - Avaliando a variável "**taxa de saturação**" do AGRC, estatisticamente as misturas com agregados 60% e 80% saturados apresentaram maiores valores de resistividade em relação aos 100% saturados.
 - A **idade** de hidratação mostrou-se a variável mais influente. Observou-se que a água presente nos agregados reciclados de alguma forma mantém umidade interna do concreto durante mais tempo. A umidade e a sua taxa de saturação do AGRC foram decisivos para que obtivesse menores valores resistividade. Assim para maiores idades de hidratação, um provável fenômeno de colmatação pode ter gerado uma menor continuidade dos poros, tornando a idade o fator predominante na resistividade elétrica nestes tipos de mistura.
 - Quanto a relação **água/cimento**, foi observado o mesmo comportamento observado em concretos convencionais; Maiores relações dão origem a concretos com menor resistividade elétrica. Foi observado para a maior relação água/cimento um decréscimo médio de 65,3% entre as misturas com AGRC.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em um âmbito geral a utilização de resíduos cerâmicos como agregados graúdos assim como outros é dependente da necessidade da pré-saturação para que a trabalhabilidade possa ser alcançada. Em contra partida a saturação parcial ou total de agregados acarreta em perdas mecânicas e de durabilidade observadas nos dados desta pesquisa.

Notou-se em todas as misturas com AGRC os resultados seguiram uma linha de resposta a qual sempre as misturas com AGRC 80% obteve os resultados mais próximos dos concretos referencia aos 63 dias de ensaio, enquanto os piores valores sempre ocorreram para as misturas com AGRC 60% e 100% saturados.

Assim chegou-se a conclusão de que não é aconselhável a saturação total dos agregados a custo da perda de resistência mecânica e aumento considerável na porosidade e permeabilidade do concreto, o que torna alto o risco da estrutura adquirir patologias em função do ambiente ao qual estará submetida. Inclusive a inserção do AGRC saturado mostrou que a perda de durabilidade é inevitável embora sua utilização possa ser feita salvo restrições ambientais e de utilização.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de engrandecer e expandir o conhecimento a respeito dos agregados cerâmicos e a influencia das taxas de saturação. Sugere-se para trabalhos futuros:

- Avaliar as mesmas taxas de saturação para outros valores de substituição de agregados naturais por agregados reciclados de origem cerâmica.
- Inserir materiais pozolanicos, densificadores de pasta ou impermeabilizadores para concretos que contenham agregados reciclados de elevada porosidade.
- Avaliar o comportamento e a influência da água aprisionada nos agregados reciclados ao longo do tempo.

- Avaliar o comportamento de misturas com agregados cerâmicos saturados com taxas em torno de 80 (70% à 85%)

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

____. ABNT NBR 10004:2004. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos Sólidos – Classificação**. Comitê: ABNT/CEE Comissão de Estudo Especial. 71 páginas, 2004.

____. ABNT NBR 15112/2004 – **Resíduos de construção e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto**. Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 7 páginas, 2004.

____. ABNT NBR15113/2004 – **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto**, implantação e operação. Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 12 páginas, 2004.

____. ABNT NBR15114/2004 – **Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Aterros – Diretrizes para projeto**, implantação e operação. Comitê: Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 12 páginas, 2004.

____. ABNT NBR 15115/2004 – **Agregados reciclados e resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 10 páginas, 2004.

____. ABNT NBR 15116/2004 – **Agregados reciclados e resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural** – Requisitos. Comitê: ABNT/CB-02 Construção Civil. 12 páginas, 2004.

____. ABNT NBR 45/2006 Agregados - **Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 8 páginas, 2006.

____. ABNT NBR 52/2009. Agregado miúdo - **Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 6 Páginas, 2009.

____. ABNT NBR 5739:2007 - **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

____. ABNT NBR NM 248/2003. Agregados - **Determinação da composição granulométrica**. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 6 Páginas, 2003.

____. ABNT NBR 6118:2007 - **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

____. ABNT NBR 9779:1995 - **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção da água por capilaridade – Método de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

____. ABNT NBR 5738:2008 - **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABRELPE(2009) – **Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**– ABRELPE. São Paulo – SP.

ABRELPE(2010) – **Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**– ABRELPE. São Paulo – SP.

ABRELPE(2011) – **Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**– ABRELPE. São Paulo – SP.

ABRELPE(2012) – **Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais– ABRELPE.** São Paulo – SP.

ALVES, F. **Betões com agregados reciclados - Levantamento do “state-of-the-art” experimental nacional.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil: Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1202-07:** Standard Test Method for Electrical Indication of concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Philadelphia, 2007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201 Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201.** ACI Materials Journal, v. 88, n. 5, p. 544-82, 1991.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201.2R Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201.** 2008. p. 1-53.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 365 Service-Life Prediction – State-of-the-Art Report.** ACI Committee 365. ACI 365.2R-00. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method. **ASTM G57.** In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2000.

Amorim, P. **Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil: Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2007.

ANDRADE, Leonardo de Brito; ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. **Estudo comparativo do comportamento de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados secos e saturados.** In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, I., e ENCONTRO NACIONAL DE

TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, X., 2004, São Paulo. Anais.. São Paulo: Centro de Convenções Rebouças, 18-21 julho 2004, 11 p.. Disponível em : http://clacs04.pcc.usp.br/portugues/instr_artigos.php.

ANDRADE, T. **Tópicos sobre durabilidade do concreto. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. Vol. 1.** Editor Geraldo Cechella Isaia, IBRACON, 2005.

ANGULO, S. C.. 2005. **Caracterização e controle de qualidade de agregados de resíduos de construção e demolição reciclado.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BAKKER, R.F. Initiation period. In: SHIESSL, P. (ed.) **Corrosion so steel in concrete.**London: Chapman and Hall, 1988, p.22-25. (RILEM Report TC 60-CSC).
Bryant Jr., J. W., Meyers, R. E., Garza, J. M. In-Place Resistivity of Bridge Deck Concrete Mixtures ACI Materials Journal, v.106, n.2, March-April 2009.

BARBA, A., FELIU, C. et al., **Materiais primas para la fabricaciòn de suportes de baldosas cerâmicas, 1 ed.** Castellón: Instituto de Tecnologia Cerâmica – AICE, 1997, 290p.

BARRA, M. **Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Armado. Barcelona 1996.** p. 223 tese(Doutorado) - Escola Tècnica Superior d' Enginyers de Camins, Canals i Ports,Universidade Politècnica de Catalunya.

BARY, B. SELLIER, A. **Coupled Moisture Carbon Dioxide calcium transfer model for carbonatation concrete.** Cement and Concrete Research, v. 34, n. 10, p. 1859-1872,2004.

BAUER L. A. F. **Materiais de Construção. 5 ed,** V. I. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 705p.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos.**1999. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)

–Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1999.

BRUSECKE, Franz. Desestruturação e desenvolvimento. FERREIRA, Leila, VIOLA, Eduardo (orgs.) **Incertezas de sustentabilidade na globalização.**Campinas: Unicamp, 1996.

BUENFELD, N.R., OKUNDI, E., **Effect of cement content on transport in concrete, Magazine of Concrete Research**, 50, N.4, 1998.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto- influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** 2003. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BUYLE-BODIN, F.; HADJIEVA-ZAHARIEVA, R. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, vol. 35, p. 504-509, september/october, 2002.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** 2007. 248p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da Influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do Concreto,** 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON (CEB). **New Approach to Durability Design – An Example for Carbonation Induced Corrosion**. (Bulletin D'Information, 238), 1997.

Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, 17 jul 2002.

CORREIA, J. R.; BRITO, J. de; PEREIRA, A. S. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. **Materials and Structures**, RILEM V. 39, p. 169–177, 2006.

COUTINHO, A.S., GONÇALVES, A., **Fabrico e Propriedades do Betão**, **Laboratório Nacionalde Engenharia Civil**, Vol. III, Lisboa, 1994.

DIAS, João Fernando; AGOPYAN, Vahan. **Determinação da absorção de agregados minerais reciclados porosos**. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, I, e ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, X, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Centro de Convenções Rebouças. ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, 10 páginas.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDZATION (CEN). **Betão: Parte 1 – Especificação, desempenho, produção e conformidade**. EN 206-1, Portugal, 2007.

GOMES, M; DE BRITO, J. **Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance** **Materials Structures**, v.42, p.663-675, 2009.

GRUN, E. et al. (2005). **Definição de Parâmetros para a Formulação de Misturas de Argilas Vermelhas**, in: 49o CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, São Pedro, SP.

GUIMARÃES, E. A. **Avaliação da capacidade protetora da resina de óleo de mamona contra a penetração de agentes agressivos no concreto**. 1997. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

Helene, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**, Tese (Livre docência) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil (1993).

HERRERO, Luis. **Desarrollo sostenible e economia ecológica**. Madrid: Sintesis, 1997.

HOFFMANN, A.T.; DAL MOLIN, D. **Influência da adição de sílica ativa, relação água aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de ions cloretos e na vida útil dos concretos**. Em: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília-DF.

HORDIJK, D.A.; VAN DER PLUIJM, R. **Behaviour of fasteners in concrete with coarse recycled concrete and masonry aggregates**. RILEM Publications SARL Paris, p. 805 – 814, 2009 in: International Symposium on Connections between Steel and Concrete. Disponível em: <https://www.rilem.net/boutique/fiche.php?page=0&cat=conference&field=produits.titreProduit&mot=recycled+aggregate&valider=ok&reference=pro021-079>.

IBGE (2010) Censo 2010 – **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Rio de Janeiro – RJ.
Instituto Militar de Engenharia – IME. **Materiais de construção II - agregados**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009. Notas de Aula.

IPT; CEMPRE (2000) **Manual de Gerenciamento Integrado – Lixo Municipal. Coordenação: Maria Luzia Otero D’Almeida, André Vilhena – 2ª edição.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. (IPT); Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), 2000. –(Publicação IPT 2622).

JOHN V. M. **A construção e o meio ambiente.** Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/aconstrução.htm>.

JOHN V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: **Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese (Livre Docência) São Paulo, 2000. 102p. Departamento de Engenharia de construção civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KAZMIERCZAK, Claudio de Souza. **Produtos de cerâmica vermelha.** In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*, Volume I. São Paulo: IBRACON, 2007. P. 563-585.

KIKUCHI, M.; DOSHO, Y.; NARIKAWA, M.; MIURA, T. (1998). **Application of Recycled Concrete Aggregate for Structural Concrete. Part. 1– Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete.** In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: “Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”*, Thomas Telford, London, p. 55-68.

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

LEITE, Mônica Batista e DAL MOLIN, Denise. **Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D.** Sitientibus, Feira de Santana-BA, no 26, p.111-130, jan./jun. 2002.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2001.

LEVY, Salomon Mony. Materiais Reciclados na Construção Civil. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais, Volume 2.** São Paulo: IBRACON, 2007. P. 1630-1657.

LIN, S. H. **Chloride diffusion in a porous concrete slab.** Corrosion Science, v. 46, n. 12, p. 964-967, 1990.

M.A. Mansur, T.H. Wee, L.S. Cheran, **Crushed bricks as coarse aggregate for concrete,** ACI Mater. J. 96 (4) (1999) 478 – 484.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H.C. **Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha.** Cerâmica, São Paulo, nº 54, p. 411-417, 2008.

MACHADO Jr., E. F.; AGNESINI, M. V. C. **Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de micro-concretos leves produzidos com argila expandida e com agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição.** Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41.,1999, Salvador. IBRACON, 1999.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo. Pini, 2008.

Ministério de Minas e Energia (2012) – **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não-Metálicos - 2012 - ano base 2011**– Ministério de Minas e Energia. Brasília – DF.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosembach. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos classe a da construção civil**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MONFORE, G.E. **The Electrical Resistivity of Concrete**. *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*. v. 10, n.2, p35-48, 1968.

MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; CABRAL JÚNIOR, Marsis. As matérias-primas cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, vol. 6, nº 2. ABC –2001.

NEPOMUCENO, A.A. **Mecanismos de transporte de fluídos no concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ed. G.C.Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v.2, p.793-827.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 3^o edição. 738pp.

OLIVEIRA, Márcio Joaquim Estefano de. **Materiais descartados pelas obras de construção civil: estudo dos resíduos de concreto para reciclagem**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, 2002.

OLIVEIRA, M. B.; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**. v.13, n. 1-3, p.113-117, 1996.

OLORUNGOSO, F.T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and concrete research**, Vol. 32, p. 179-185,2002.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. **Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation**. ACI Materials Journal, nº 88, p. 363 - 373, 1991.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS e Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2009.

PEREIRA, V.G.A; DAL MOLIN, D.C.C. **Estudo da influencia do tipo de cimento, da relação água/cimento, da temperatura e do tempo de cura na resistência à compressão de concretos**. Em: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília- DF.

PINTO, T. P. **Metodologia para Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Civil**. São Paulo, 1999. 186p. Tese (Título de Doutorado) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

PINTO, T. P. **Metodologia para Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Civil**. São Paulo, 1999. 186p. Tese (Título de Doutorado) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

POLDER, R. B. **Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation**. Construction and Building Materials. V.15, No.2-3, p.125-131, 2001.

POON, C. S.; KOU, S.C.; LAM, L. **Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete**. In:Materials and Structures. 2007.

POWERS, T.C., COPELAND, L.E., HAYES, J.C., MANN, H.M., **Permeability of Portland cement paste**, Journal of the American Concrete Institute, pp. 285-298, November 1954.

ROBLES, R. A. **Previsão do comportamento de betões com agregados reciclados -Levantamento do “state-of-the-art” experimental internacional**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil: Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2007.

ROSENBERG; A. **Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete "Materials science of concrete/** edited by P. Skalny" - 1989 - The American Ceramic Society - Westerville, OH - USA.

RYU, J. S. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, Vol 54, nº01, p 12, 2002.

SACHS, Ignacy. **Estratégias de transição para o século XXI - desenvolvimento e meio ambiente**. São Paulo: Studio Nobel/Fundap, 1993.

SALEM, R. M.; BURDETTE, E. G. Role of chemical and mineral admixtures on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 5, p.558-563, 1998.

SCHIESSL, P. (1987) – Influence of composition of concrete on the corrosion protection of the reinforcement, ACI, **Concrete Durability**, SP-100, pp. 1633-1650.

SILVA FILHO, L.C.P **Durabilidade do concreto à ação de concretos: análise do efeito da permeação de água e da adição da microssílica**. Porto Alegre, 1994. 194p. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TROIAN, A. **Avaliação da influência do agregado reciclado de concreto na penetração de íons cloreto**. 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, 2010.

TU, T.; CHEN Y.; HWANG, C. Properties of HPC with recycled aggregates. **Cement and concrete research**, Vol 36. 2006.

TU, Tsung-Yueh; CHEN, Yuen-Yuen, HWANG, Chao-Lung. Properties of HPC with recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**. Elsevier, n° 36, p. 943–950, 2006.

VIEIRA, G. L. **A influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. Porto Alegre, 2008. 189p. Tese (Doutorado) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

WERLE, A.P. **Estudo da influência do agregado reciclado de concreto na carbonatação de concretos**. 2010. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

WHITING, D.A; NAGI, M.A. **Electrical Resistivity of Concrete – A literature Review**. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003. 57p.

WIRQUIN, E.; HAHDJEVA-ZAHAARIEVA, R.; BUYLE-BODIN F. Utilisation del'absortion d'eau des bétons comme critères de leur durabilité- Application auxbétons de granulats recyclés. **Materials and Structres/ materiaux etConstructions**. v.33, p. 403-408, julho de 2000.

ZAKARIA, M.; CABRERA, J. G. **Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash aggregate**. Waste Management, Vol. 16, p.151-158, 1996.

ZORDAN S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado). UNICAMP/FEC.