

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

TATIANE ISABEL HENTGES

**TRATAMENTO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO POR
CARBONATAÇÃO E POR IMPREGNAÇÃO COM MICROFINOS DE CERÂMICA
VERMELHA**

São Leopoldo

2018

TATIANE ISABEL HENTGES

**TRATAMENTO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO POR
CARBONATAÇÃO E POR IMPREGNAÇÃO COM MICROFINOS DE CERÂMICA
VERMELHA**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em
engenharia civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marlova Piva Kulakowski

São Leopoldo

2018

H527t

Hentges, Tatiane Isabel.

Tratamento do agregado reciclado de concreto por carbonatação e por impregnação com microfinos de cerâmica vermelha / Tatiane Isabel Hentges. – 2018.

158 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

“Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marlova Piva Kulakowski.”

1. Agregado reciclado de concreto. 2. Carbonatação. 3. Microfinos de cerâmica vermelha. 4. Sequestro de carbono. I. Título.

CDU 624

Aos meus pais, Ivo e Zenaide.

Ao Eduardo, meu noivo.

AGRADECIMENTOS

Ao mais importante: Deus. Agradeço por sempre colocar pessoas especiais em minha vida, que me apoiam, me alegram e me fazem melhor como ser humano.

Agradeço à minha orientadora, Marlova, que há seis anos forma em mim uma pesquisadora e que a cada ano se torna um pouco mais amiga e um pouco mais mãe.

Aos meus pais, que mesmo longe sempre me proporcionaram tudo o que preciso: palavras de amor, abraços carinhosos, bens materiais e que instigaram em mim a vontade de sempre ser e fazer melhor. À minha irmã, Aline, com quem tenho aprendido muito. Ao meu irmão Alencar, que esteve pertinho durante todo o mestrado ajudando sempre que precisei.

Ao Eduardo, companheiro de vida e hoje noivo. Que se reinventa a cada dia para me fazer rir. Que respeita os incontáveis momentos em que fico estudando. Que me faz sair da rotina e que sempre demonstra o quanto me ama.

À Patricia e à Paôla, amigas fortalecidas no mestrado, confidentes das emoções desses dois anos. À Bárbara e à Angélica, amigas desde a graduação.

À Vanessa, uma bolsista melhor do que eu poderia pedir. Com potencial para ir muito longe.

Aos professores do programa de pós-graduação em engenharia civil da Unisinos, pelo conhecimento transmitido e pelas dicas preciosas. À Simone, sempre alegre e pronta para ajudar.

À Coneresul, empresa doadora dos materiais. Em especial ao Marcelo Krumenauer que ajudou esta pesquisa com satisfação.

Aos laboratoristas do laboratório de materiais de construção da Unisinos: Mauricio, Ingrid, Julio, Thiago, André e David, por terem sido ótimos profissionais. Aos profissionais dos demais laboratórios, pelo apoio.

À Capes, pelo bolsa de mestrado. Ao CNPq pelo auxílio financeiro à pesquisa.

“Porque engenharia é isso, senhores, um dia o homem precisou se locomover mais rápido e então um engenheiro criou o automóvel, um dia as cidades precisaram de mais moradia em menos espaço, então um engenheiro criou os altos edifícios, um dia era preciso passar por um rio ou por uma estrada e a engenharia criou pontes e viadutos (...)”.

(Autoria própria)

RESUMO

Pesquisas vêm desenvolvendo formas de mitigar os efeitos da absorção de água de agregados graúdos reciclados quando inseridos em novas misturas de concreto, de forma que as características mecânicas e de durabilidade desses agregados e dos concretos que o empregam sejam melhoradas. Destacam-se, nesse sentido, a carbonatação e a impregnação em solução de pozolanas. Este trabalho teve como objetivo avaliar o tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto através da carbonatação e da impregnação de microfinos de cerâmica vermelha (MCV), para emprego em misturas de concreto. Para avaliação do tratamento do AGRC foi executada absorção de água dos agregados, abatimento ao longo do tempo e resistividade elétrica dos concretos no estado fresco, além de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade no estado endurecido. Foi, ainda, realizada análise por microscópio eletrônico de varredura dos agregados e da zona de transição com novas argamassas. Por último, foi realizada análise da redução nas gerações de gás carbônico devido ao uso de AGRCs e à carbonatação. Como resultados, tem-se a redução da absorção de água dos agregados, verificada também pela resistividade elétrica no estado fresco. O abatimento ao longo do tempo não apresentou diferenças significativas com a alteração no tipo de agregado utilizado. As propriedades mecânicas dos concretos contendo AGRC tratado com MCV são comparáveis às de concretos contendo apenas agregados naturais e os concretos contendo AGRC carbonatados não reduzem significativamente as resistências. A absorção de água por capilaridade foi reduzida ao empregar concretos com agregados carbonatados e aumentou para os concretos com AGRC tratado com MCV, de forma similar a outros trabalhos que empregaram pozolanas. Analisando-se as emissões de CO₂ isoladamente por parte dos agregados reciclados, verifica-se a redução de 40% com o emprego desses e de 49% com a carbonatação dos mesmos. Por outro lado, quando verificada a ecoeficiência das emissões por MPa considerando o consumo de cimento, essa diferença é reduzida de forma que as emissões relativas se apresentam com valores similares.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto. Carbonatação. Microfinos de Cerâmica Vermelha. Sequestro de carbono.

ABSTRACT

Research has been developing ways to mitigate water absorption effects from recycled concrete aggregates use in new concrete mixtures, so that the mechanical and durability characteristics of these aggregates and the concretes that use it are improved. In this sense, the carbonation and impregnation in solution of pozzolans are highlighted. This study aimed to evaluate the treatment of coarse recycled concrete aggregate (CRCA) by carbonation and impregnation of red ceramic microfiners (RCM) powder for use in concrete mixtures. To evaluate the treatment of the CRCA, water absorption of the aggregates, reduction over time and electrical resistivity of the concretes in the fresh state were performed, as well as compressive strength and water absorption by capillarity in the hardened state. It was also carried out by scanning electron microscope of the aggregates and the transition zone with new mortars. It was also performed by analysis of scanning electron microscope aggregates and the transition zone with new mortar. Finally, was conducted analysis of the reduction in the generation of carbon dioxide from the use of CRCAs and carbonation. As results, there is a reduction in the water absorption of the aggregates, also verified by the electrical resistivity in the fresh state. The slump loss did not present significant differences by changes on aggregate type used. The mechanical properties of the concrete containing CRCA treated by RCM are comparable to those of concrete containing only natural aggregates, and the concrete containing carbonated CRCAs do not significantly reduce the strengths. The capillary water absorption was reduced when using concrete with carbonate aggregates and increased for concrete with CRCA treated with RCW, in a similar way to other works that used pozzolanas. Analyzing CO₂ emissions alone from the recycled aggregates, the reduction of 40% is achieved using these and 49% by the carbonation of them. On the other hand, when the eco-efficiency of the emissions per MPa is verified considering the cement consumption, this difference is reduced so that the relative emissions present themselves with similar values.

Key-words: Recycled concrete aggregate. Carbonation. Red ceramic microfiners. Carbon Sequestration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Absorção por imersão de agregados graúdos ao longo de 72 horas	34
Figura 2 – Abatimento ao longo do tempo de concretos com 0%, 20%, 50% e 100% de agregados reciclados.....	37
Figura 3 – Abatimento de concretos com AGRC com aditivos e sílica ativa	38
Figura 4 – Efeito da densidade de partícula do agregado reciclado sobre a resistência normalizada do concreto.....	39
Figura 5 – Formas de mistura tradicional (NMA) e em dois estágios (TSMA) do concreto ...	44
Figura 6 – Estrutura do AGRC empregando mistura i) normal (NMA); ii) em duas etapas, com sílica ativa; e iii) em duas etapas, com sílica ativa e cimento.....	45
Figura 7 – Abatimento de concretos com AGRC inseridos no início e no fim da mistura	46
Figura 8 – Abatimento de concretos com AGRC tratado com álcool polivinílico.....	48
Figura 9 – Comparação de DRX para pastas de cimento não carbonatadas, carbonatadas ao natural e carbonatadas a 10% de CO ₂	51
Figura 10 – Formatos de calcita encontrados em pasta de cal após carbonatação acelerada (b) e natural (a e c): (a) escalenoedro; (b) romboédrico; (c) amorfo ou em esférulas.	52
Figura 11 – Aumento de massa e consumo de CO ₂ para diferentes teores de umidade relativa	54
Figura 12 – Estrutura microscópica de concreto não carbonatado (a) e submetido à carbonatação por 7 dias a 10% (b), 20% (c) e 50% de CO ₂ (d).	55
Figura 13 – Mecanismo de difusão da carbonatação no concreto sob (a) alta e (b) baixa concentração de CO ₂	56
Figura 14 – Densidade em função do tamanho médio da partícula.....	59
Figura 15 – Curva de absorção de AGRC (a) 25 mm e (b) 12,5 mm não carbonatado e carbonatado.....	60
Figura 16 – Resistência à compressão e permeabilidade a gás de concretos com agregados carbonatados e não carbonatados	61
Figura 17 – Superfície do AGRC (a) sem tratamento e (b) tratado com sílica ativa.....	65
Figura 18 – Esquema do circuito elétrico empregado no experimento	68
Figura 19 – Evolução da temperatura ao longo do tempo de pastas com AEH	74
Figura 20 – Distribuição granulométrica dos MCV	76
Figura 21 – Imagem em MEV dos MCV (aumento de 1500x).....	76
Figura 22 – Imagem em MEV dos MCV (aumento de 10.000x).....	76

Figura 23 – Difratoograma de Raios X dos microfinos de cerâmica vermelha	77
Figura 24 – Granulometria do agregado miúdo natural	78
Figura 25 – Granulometria do agregado graúdo.....	79
Figura 26 – Cominuição dos corpos de prova	80
Figura 27 – Diluição dos MCV em água.....	83
Figura 28 – Inserção do AGRC na solução	83
Figura 29 – Embalagens utilizadas no sazonalimento dos agregados reciclados.....	84
Figura 30 – Sistema dos equipamentos utilizados na carbonatação acelerada.....	85
Figura 31 – Display do medidor de CO ₂ utilizado na pesquisa.....	86
Figura 32 – Sonda para medição da concentração percentual de CO ₂	86
Figura 33 – Forma para amostras de 1x1x1 cm com agregados posicionados.....	89
Figura 34 – Amostras desmoldadas e cortadas ao meio.....	89
Figura 35 – Esquema de montagem para o ensaio de absorção de água dos agregados	91
Figura 36 – Recipiente e tampa utilizados para ensaio de abatimento ao longo do tempo	92
Figura 37 – Recipiente plástico utilizado para resistividade elétrica	93
Figura 38 – Tampa desenvolvida para evitar a perda de água durante o ensaio de resistividade elétrica no estado fresco	93
Figura 39 – Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	94
Figura 40 – Esquema para determinação química do CO ₂ consumido na carbonatação	95
Figura 41 – Aparência dos agregados reciclados utilizados nesta pesquisa.....	97
Figura 42 – Absorção de água ao longo do tempo dos agregados	99
Figura 43 – Absorção média nos minutos iniciais dos agregados graúdos	100
Figura 44 – Imagem MEV da interface entre AGRC-R e nova argamassa (aumento de 70x)	103
Figura 45 – Imagem MEV da interface entre AGRC-P e nova argamassa (aumento de 100x)	103
Figura 46 – Imagem MEV da interface entre AGRC-C e nova argamassa (aumento de 100x)	103
Figura 47 – Imagem MEV da zona de transição entre AGRC-R e nova argamassa (aumento de 1.000x).....	104
Figura 48 – Imagem MEV da zona de transição entre AGRC-P e nova argamassa (aumento de 1.500x).....	104
Figura 49 – Imagem MEV da zona de transição entre AGRC-C e nova argamassa (aumento de 1.000x).....	105

Figura 50 – Imagem MEV dos produtos da carbonatação (aumento de 6.000 x).....	106
Figura 51 – Imagem MEV dos produtos da carbonatação (aumento de 15.000 x).....	106
Figura 52 – Abatimento ao longo do tempo dos concretos estudados	107
Figura 53 – Aparência dos concretos aos 60 minutos no ensaio de perda de abatimento.....	110
Figura 54 – Médias de abatimento para cada tipo de agregado.....	111
Figura 55 – Médias dos abatimentos para cada relação a/c.....	111
Figura 56 – Resistividade elétrica no estado fresco dos concretos estudados.....	112
Figura 57 – Médias de resistividades dos concretos no estado fresco	113
Figura 58 – Concreto com AGRC após mistura onde foram identificadas bolhas de ar.....	114
Figura 59 – Médias da absorção capilar de água para de cada tipo de agregado graúdo	117
Figura 60 – Resistência a compressão média dos concretos aos 7 dias	119
Figura 61 – Resistência a compressão média dos concretos aos 28 dias	119
Figura 62 – Médias da Resistência à compressão para de cada tipo de agregado.....	121
Figura 63 – Relação entre a curva de Abrams e o consumo de cimento dos concretos estudados	122
Figura 64 – Emissão de CO ₂ relativa aos agregados graúdos (m ³) por unidade de resistência dos concretos estudados	125
Figura 65 – Emissão de CO ₂ relativa aos agregados graúdos (m ³) somada ao consumo de cimento por unidade de resistência dos concretos estudados	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesquisas do grupo Gmat relacionadas ao uso de AGRC	26
Tabela 2 – Massa específica de agregados graúdos naturais e reciclados.....	32
Tabela 3 – Porosidades de agregados graúdos naturais e reciclados.....	33
Tabela 4 – Absorção de água de agregados reciclados	35
Tabela 5 – Especificações internacionais para o uso do agregado reciclado de concreto.....	42
Tabela 6 – Fatores de controle com níveis variáveis de estudo.....	71
Tabela 7 – Fatores de controle com níveis variáveis de estudo.....	73
Tabela 8 – Caracterização física do agregado miúdo	77
Tabela 9 – Caracterização granulométrica do agregado miúdo utilizado na pesquisa.....	78
Tabela 10 – Caracterização física do agregado graúdo natural	79
Tabela 11 – Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural utilizado na pesquisa	79
Tabela 12 – Caracterização física do agregado graúdo reciclado de concreto.....	81
Tabela 13 – Teor de argamassa para cada fração granulométrica do AGRC.....	82
Tabela 14 – Traços unitários e consumo de materiais.....	87
Tabela 15 – Massas específicas dos agregados após tratamento.....	98
Tabela 16 – Absorção de água dos agregados aos 10 minutos, 2 horas, 24 horas e total	100
Tabela 17 – Análise de variância (ANOVA) para a absorção dos AGRC.....	102
Tabela 18 – Fatores climáticos e aditivo para cada mistura de concreto	107
Tabela 19 – Análise de variância (ANOVA) para o abatimento ao longo do tempo dos concretos.....	111
Tabela 20 – Média das resistividades elétricas no estado fresco de cada relação a/c dos concretos.....	113
Tabela 21 – Análise de variância (ANOVA) para a resistividade elétrica no estado fresco de concretos com AGRC.....	115
Tabela 22 – Taxa de absorção capilar, porosidade efetiva e absorção final capilar para os concretos executados	116
Tabela 23 – Análise de variância (ANOVA) para a absorção capilar dos concretos.....	118
Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA) para a resistência à compressão dos concretos	121
Tabela 25 – Cálculo das emissões e sequestro de CO ₂ por m ³ de agregado graúdo empregado	124

Tabela 26 – Cálculo das emissões e sequestro de CO₂ por m³ de agregado graúdo empregado

..... 126

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1. Justificativa	24
1.2. Objetivos.....	26
1.2.1. Objetivo Geral.....	26
1.2.2. Objetivos Específicos	26
1.3. Estrutura da pesquisa	27
1.4. Delimitações do trabalho	27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1. Agregado graúdo reciclado de concreto	29
2.1.1. Origem	29
2.1.2. Características do AGRC.....	31
2.1.3. Concretos com AGRC	36
2.1.4. Normas para emprego do AGRC.....	41
2.2. Formas de mitigação da absorção de água do ARC.....	43
2.2.1. Procedimentos de mistura	44
2.2.2. Tratamento do ARC.....	47
2.3. Carbonatação do concreto	49
2.3.1. Reação da carbonatação no concreto	49
2.3.2. Fatores que determinam a velocidade de carbonatação	52
2.3.3. Características de concretos carbonatados.....	57
2.3.4. Carbonatação do ARC	58
2.4. Microfinos de cerâmica vermelha	61
2.4.1. Atividade pozolânica da cerâmica vermelha	62
2.4.2. Imersão do ARC em solução de pozolanas	64
2.5. Resistividade elétrica do concreto no estado fresco.....	66
3. METODOLOGIA.....	71
3.1. Fatores e variáveis	71
3.1.1. Fatores de controle com níveis variáveis	71
3.1.2. Fatores de controle com nível fixo	71
3.1.3. Fatores não controlados	71
3.1.4. Variável de resposta.....	72
3.2. Materiais.....	72

3.2.1.	Cimento.....	72
3.2.2.	Aditivos.....	73
3.2.3.	Microfinos de cerâmica vermelha.....	75
3.2.4.	Agregado miúdo	77
3.2.5.	Agregado graúdo natural	78
3.2.6.	Agregado graúdo reciclado de concreto	80
3.2.7.	Água.....	86
3.3.	Produção dos concretos.....	86
3.3.1.	Determinação dos traços	86
3.3.2.	Execução das misturas	87
3.3.3.	Moldagem e cura dos corpos de prova	88
3.4.	Métodos	90
3.4.1.	Absorção de água dos agregados	90
3.4.2.	Abatimento de tronco de cone	91
3.4.3.	Resistividade elétrica no estado fresco	92
3.4.4.	Resistência à compressão axial.....	93
3.4.5.	Absorção capilar dos concretos	94
3.4.6.	Determinação do sequestro de CO ₂ pelos agregados reciclados	95
3.4.7.	Análise microestrutural.....	96
3.4.8.	Análise estatística dos resultados.....	96
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	97
4.1.	Tratamento dos agregados.....	97
4.1.1.	Aspecto geral dos agregados reciclados	97
4.1.2.	Massa específica	98
4.1.3.	Absorção de água dos agregados	99
4.1.4.	Análise microestrutural.....	102
4.2.	Concretos.....	106
4.2.1.	Abatimento ao longo do tempo.....	106
4.2.2.	Resistividade elétrica dos concretos no estado fresco	112
4.2.3.	Absorção de água por capilaridade.....	116
4.2.4.	Resistência à compressão.....	119
4.3.	Ecoeficiência quanto às emissões dos concretos estudados.....	123
5.	CONCLUSÃO.....	129
5.1.	Considerações finais	129

5.2. Sugestões para trabalhos futuros	131
REFERÊNCIAS	133
APÊNDICE A	147
APÊNDICE B.....	149
APÊNDICE C	151
APÊNDICE D	153
APÊNDICE E	155
APÊNDICE F	157

1. INTRODUÇÃO

Foram coletadas no Brasil, no ano de 2016, mais de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD). (ABRELPE, 2016). A composição deste resíduo varia para diferentes países. Porém, a fração “concreto” apresenta-se, em média, com percentuais acima de 50%. (ZHENG et al. 2017). Outro material importante devido ao seu potencial de reciclagem é o resíduo cerâmico. Segundo IPEA (2012), este representa uma média de 22,2% do total de RCD no Brasil totalizando aproximadamente 10 milhões de toneladas de resíduo cerâmico ao ano.

Entre os principais problemas da utilização do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) destaca-se a sua maior porosidade quando comparado com agregados graúdos naturais (AGN). Devido a esta porosidade, o uso desses em novas misturas de concreto acarreta em redução da consistência no estado fresco, pois apresentam uma grande absorção de água característica. (ECKERT; OLIVEIRA, 2017). Além disso, há uma tendência geral de redução da resistência mecânica e da durabilidade, medida a partir da penetração de cloretos e da carbonatação, em concretos que empregam AGRC.

Para mitigar esse efeito, diversos estudos vêm buscando formas de melhorar as propriedades no estado fresco e endurecido de novas misturas de concreto. Entre elas, destacam-se a pré-saturação dos agregados, as alterações nas etapas de mistura do concreto com AGRC, a impregnação dos agregados com hidrofugantes, o tratamento com pozolanas e a carbonatação dos agregados reciclados. (PADOVAN, 2013; NOGUEIRA, 2015; TAM; TAM, 2008; SALAS et al., 2013; SANTOS, 2016; KATZ, 2004; XUAN; ZHAN; POON, 2017).

Ao ser estudada como agregado para concreto, o resíduo de cerâmica vermelha (RCV) não se mostrou benéfico, pois além de apresentar altas taxas de absorção de água, sua resistência é baixa. (NEPOMUCENO; ISIDORO; CATARINO, 2018). Por outro lado, quando utilizada como material cimentício suplementar, o RCV passa a apresentar efeito pozolânico, trazendo benefícios para o concreto devido à colmatação dos poros, aumentando sua resistência e durabilidade. (GUILLANTE et al., 2017).

Além do aproveitamento de resíduos, a redução nas emissões de gás carbônico no ambiente por parte da indústria da construção civil, vem sendo estudada através do sequestro de CO₂ pela da carbonatação dos concretos. (SOUTO-MARTINEZ et al., 2017). A carbonatação que é vista como uma manifestação patológica nas construções para as estruturas de concreto armado começa a ter seus benefícios percebidos devido ao efeito de

preenchimento dos poros, aumento de densidade e da dureza superficial. Assim, surge a oportunidade de melhoria do AGRC através da carbonatação. (XUAN; ZHAN; POON, 2017).

1.1. Justificativa

Segundo McGinnis et al. (2017), o uso de agregados reciclados no lugar de agregados naturais economiza aproximadamente 40% de energia, além de representar apenas 60% da emissão de dióxido de carbono gerada no emprego de agregados naturais. Isso se deve principalmente às distâncias de transporte, já que usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição, em geral, são mais próximos das indústrias que utilizam agregados. Por outro lado, Hamad e Dawi (2017) afirmam que a cada metro cúbico gerado de concreto empregando AGRCs no lugar de AGNs, 51,3 litros de água a mais são necessários. Surge, dessa forma, o desafio de minimizar a absorção de água de AGRCs.

Os benefícios do uso combinado de pozolanas e AGRC no concreto já são conhecidos na literatura. Kurda, Brito e Silvestre (2017), ao comparar diversos trabalhos, afirmam que a substituição de AGN por AGRC em teores acima de 30% passa a ser prejudicial para a durabilidade e resistência de concretos, porém esse efeito pode ser revertido ao utilizar cinza volante em substituição ao cimento. Isso porque concretos com 50% de AGRC e 50% de cinza volante não apresentaram diferenças significativas em relação à resistência mecânica e durabilidade quando comparados com concretos de referência. Omrane et al. (2017) encontraram bons resultados também no estado fresco de concretos auto adensáveis contendo agregados reciclados e pozolanas naturais. Até mesmo pozolanas não tradicionais foram estudadas e também mostram efeitos benéficos para concretos com AGRC principalmente quanto à durabilidade, pelo fato de preencherem os poros e zona de transição com novos produtos de hidratação. Esses efeitos, no entanto, são percebidos geralmente em idades mais avançadas devido à reação mais lenta das pozolanas. (ALNAHHAL et al., 2018).

O tratamento de AGRCs com pozolanas também se mostrou benéfico. Katz (2004) realizou imersão do AGRC em solução de sílica ativa antes da mistura do concreto e obteve 15% de aumento na resistência à compressão em concretos com 100% de AGRC tratado. Ao utilizar duas etapas de mistura, Tam e Tam (2008) fortaleceram e densificaram a superfície do AGRC, bem como a zona de transição antiga e nova com o emprego de sílica ativa, isso resultou em aumento de 19,5% na resistência à compressão ao empregar 25% de AGRC. Salas et al. (2013), também alteraram o método de mistura e conseguiram maiores abatimentos para os concretos com diversos teores de AGRCs misturados inicialmente com

cinzas volantes. A partir disso, Bui, Satomi e Takashi (2018) realizaram uma mistura inicial dos AGRCs com silicato de sódio com o objetivo de ativar a reação pozolânica. Os pesquisadores alcançaram melhorias de 33% na resistência à compressão de concretos com 25% de AGRC após o tratamento. Nesses trabalhos, o tratamento dos AGRCs se deu através do tratamento superficial, onde a pozolana entrou também nas fissuras e zona de transição presente no AGRC. A parte interna do agregado não foi atingida pelo fato dos tratamentos terem ocorrido em poucas horas antes da mistura do concreto.

A melhoria de propriedades de agregados reciclados de concreto também foi desenvolvida através da carbonatação. Em agregados miúdos, Zhao et al. (2016) obtiveram um aumento de densidade médio de 4,2% e uma redução na absorção de água e na porosidade de 32,7% e 6,3%, respectivamente, após a carbonatação. Xuan, Zhan e Poon (2016) ao executar concretos com AGRCs verificaram um aumento médio de 12,3% na resistência a compressão quando os concretos empregaram AGRCs carbonatados. Nesta pesquisa, a absorção de água dos agregados teve uma redução aproximada de 1% e os concretos apresentaram resistência a cloretos 36,4% maior e resistência à permeabilidade de gás 42,4% superior, quando comparados com concretos de AGRCs não carbonatados. (XUAN; ZHAN; POON, 2017). Além disso, Talukdar e Banthia (2015), com base nas previsões de mudanças climáticas, indicam que haverá maior profundidade de carbonatação de estruturas de concreto expostas.

Percebem-se, então, oportunidades de melhorias nas propriedades de agregados reciclados de concreto (ARCs) através da carbonatação e da impregnação de microfinos de cerâmica vermelha (MCV). Assim, os benefícios alcançados serão vistos tanto através do emprego de ARCs em concretos, quanto na redução geração e sequestro de CO₂ do ambiente, quanto na minimização da disposição resíduos de concreto e de cerâmica vermelha, que também passa a ser considerada como uma pozolana.

Ao propor avaliar, comparativamente, dois métodos de tratamento do AGRC, este trabalho enquadra-se à linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida desde o ano de 2007 pelo Gmat (Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, onde foram desenvolvidos trabalhos que estudaram a inserção do AGRC no concreto sob diferentes focos, que vão desde os teores de substituição de AGN por AGRC, a utilização e os teores de pré-molhagem, o uso de AGRC de indústrias de pré-moldado, a combinação do uso de teores de AGRC com teores de cinza de casca de arroz, o método de mistura do concreto com AGRC e o uso do AGRC como agente de cura interna do concreto. Tais pesquisas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Pesquisas do grupo Gmat relacionadas ao uso de AGRC

Pesquisador (ano)	Relação com o AGRC na pesquisa
Troian (2010) Werle (2010)	Teor de substituição e teor de pré-molhagem
Gonçalves (2011) Cavalheiro (2011)	Resíduo de concreto pré-fabricado submetido a diferentes formas de cura
Padovan (2013)	Teor de pré-molhagem e uso de aditivo
Fedumenti (2013) Sartori (2013) Cecconello (2013)	Uso de teores de cinza de casca de arroz com diferentes teores de AGRC
Nogueira (2015)	Método de mistura
Jordani (2016)	Uso como agente de cura interna

Fonte: Elaborada pela autora

Além do AGRC, o Gmat também vem desenvolvendo pesquisas com o resíduo de cerâmica vermelha, onde podem ser citados os trabalhos de Sebastiany (2014), Hansen (2016), Guillante et al. (2017) e Guillante, Kulakowski e Mancio (2017).

Dessa forma, este trabalho une duas linhas de pesquisa (AGRC e RCV) e engloba os conhecimentos desenvolvidos na busca por melhorar as propriedades de um resíduo aproveitando as características de outro. Além disso, é proposto outro método de tratamento do AGRC através da carbonatação.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar comparativamente o efeito do tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto, por carbonatação e por impregnação com microfinos de cerâmica vermelha, no comportamento de novos concretos.

1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos visam avaliar o efeito do tratamento no comportamento do AGRC quanto:

- a) À absorção de água e massa específica dos agregados;
- b) À modificação da microestrutura do agregado e da interface entre agregado e argamassa;
- c) À influência nas propriedades do concreto fresco estabilizado que incorpora o AGRC;

- d) À influência na resistência à compressão e à absorção de água capilar de concretos com os AGRC;
- e) Às emissões e sequestro de carbono do concreto.

1.3. Estrutura da pesquisa

Este trabalho é desenvolvido em cinco capítulos.

No primeiro capítulo se encontra a introdução, a justificativa, os objetivos, a estrutura e as delimitações da pesquisa.

O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes ao tema pesquisado, como o agregado graúdo reciclado de concreto e sua utilização em novos concretos em substituição ao agregado natural, as formas de mitigação dos efeitos da absorção de água dos agregados reciclados, a carbonatação do concreto, os microfios de cerâmica vermelha como pozolana e a resistividade elétrica como método de avaliação do concreto no estado fresco, com vistas à análise das variações que a presença do AGRC causa na mistura.

O programa experimental do estudo, os materiais e métodos que foram utilizados na pesquisa, bem como o tratamento dos agregados, estão contemplados no capítulo três.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos na pesquisa e discute a influência dos agregados e do tratamento dos mesmos. Além disso, é feita uma análise da geração e sequestro de CO₂ devido ao uso de AGRCs e sua carbonatação.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a pesquisa, bem como as sugestões de temas para futuros trabalhos.

1.4. Delimitações do trabalho

Há vários fatores que podem influenciar o efeito da utilização de AGRC com e sem tratamento no concreto. Assim, os limites estabelecidos no programa experimental deste trabalho foram:

Foi utilizado apenas um tipo de cimento: CP II-F. Isso se deu pelo fato desse cimento não possuir adições minerais pozolânicas, que podem vir a influenciar nos resultados obtidos tanto no estado fresco quanto no endurecido. É, também, um dos tipos de cimento mais utilizado em pesquisas do grupo. Além disso, sabe-se, empiricamente, que este é o cimento mais empregado nas indústrias de pré-fabricados e nas empresas de serviços de concretagem

da região sul do país, ainda que não existam dados nem provenientes do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento e da Associação Brasileira de Cimento Portland.

O tipo de agregado reciclado empregado foi resíduo de concreto proveniente de controle tecnológico de empresa fornecedora de concreto. A classe de resistência do concreto utilizada é C25.

Os percentuais de substituição de agregado natural por reciclado foram de 0% e 25%, baseando-se no que, em média, é permitido por norma em âmbito internacional para utilização em estruturas quando o agregado reciclado possui características de baixa resistência mecânica e alta porosidade.

Foi empregado aditivo estabilizador de hidratação no teor de 0,2% para que os resultados obtidos nos ensaios realizados no estado fresco fossem devido às variações causadas apenas pela presença de AGRC, evitando-se que a hidratação do cimento exerça influência.

As relações água/cimento empregadas no trabalho foram: 0,45, 0,55 e 0,65. Próximas ao que já foi empregado no grupo de pesquisa e coincidentes com os valores adotados por Braun (2015) e Hentges, Kulakowski e Mancio (2015), onde também foi utilizada a resistividade elétrica no estado fresco.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica estão apresentados assuntos relacionados ao agregado graúdo reciclado de concreto e sua inserção em substituição ao agregado natural, às formas de mitigação dos efeitos da absorção de água dos agregados reciclados, à carbonatação do concreto, aos microfinos de cerâmica vermelha como pozolana e à resistividade elétrica como método de avaliação do concreto no estado fresco.

2.1. Agregado graúdo reciclado de concreto

Proveniente do tratamento de resíduos de construção e demolição, o agregado reciclado de concreto é um material granular que apresenta características técnicas para ser aplicado em obras de edificação e de infraestrutura, conforme instrução da NBR 15116 (ABNT, 2004). A utilização de ARCs vem sendo estudada pelo fato de que o seu aproveitamento no concreto reduz a extração de recursos naturais, diminui a disposição de resíduos em aterros e, com estudos específicos, pode vir a compatibilizar as propriedades finais do concreto produzido com as de concretos contendo apenas agregados naturais.

O ARC apresenta características diferentes do agregado natural, entre elas maior porosidade e absorção de água e menor resistência mecânica. Com isso, ocorrem alterações nos concretos produzidos com esse material, entre elas a diminuição da consistência no estado fresco e, no estado endurecido, em geral, percebe-se a redução da resistência mecânica e da resistência ao ataque de cloretos e à carbonatação.

Considerando tais características, diversos países elaboraram normas para a utilização de agregados reciclados de concreto em estruturas de concreto, permitindo percentuais baixos de substituição dos agregados naturais.

2.1.1. Origem

A origem do ARC possui grande influência sobre as propriedades do agregado e também sobre o comportamento dos concretos que o incorporam. Por isso, pesquisas que estudam a utilização de ARC em concretos apresentam grande variabilidade em seus resultados.

O agregado reciclado de concreto pode ser proveniente de resíduos de construção ou demolição de obras civis, resíduos empresas de pré-fabricados e pré-moldados, resíduos de

empresas de serviço de concretagem que tiveram volumes de material retornados e também a partir do controle tecnológico do concreto no estado endurecido (BEHERA et al., 2014).

Os agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição se mostram os mais heterogêneos quanto à composição, pois geralmente estão misturados com materiais cerâmicos, gesso, grandes frações de argamassas e até solo (BERNARDES et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2011). Dessa forma, para a obtenção de agregados reciclados apenas da fração concreto desses resíduos, há um grande trabalho anterior à britagem, que é a triagem prévia.

Já os ARC provenientes de empresas de pré-moldados e pré-fabricados apresentam maior regularidade com relação às propriedades. Os resíduos gerados por estas podem ser provindos de problemas com as estruturas ocorridos no transporte, sobras de moldagens, falhas de produção, cancelamento de contrato e revisão de projeto (SILVA, 2014). Assim, é facilitada a separação por tipo de estrutura, classe de resistência e traços. (LEITE; COSTA, 2014) Neste caso, tem-se a garantia da constância do nível de qualidade do concreto, pois é realizado o controle tecnológico para os lotes de produção.

As empresas fornecedoras de concreto também possuem um volume considerável de resíduo de concreto. Ainda que o percentual de perda em relação à produção de concreto nessas empresas seja em torno de 2% a 5% para empresas nacionais e de 0,5% estimado para a produção mundial, esses teores equivalem, respectivamente, a 8000 m³ mensais e 125 milhões de toneladas anuais descartadas ao ano (VIEIRA, 2010; VIEIRA; FIGUEIREDO, 2013; KAZAZ, 2009). Esse resíduo se deve: à rejeição de lotes na aceitação provisória durante o controle tecnológico no estado fresco; ao excesso de volume de material transportado; à ineficiência do caminhão quanto à mistura do concreto; e principalmente ao restante de material que permanece no caminhão e é removido durante a limpeza da betoneira. Nessa situação também há garantia da homogeneidade do resíduo, pois as empresas costumam empregar traços constantes para uma mesma classe de resistência (BUTTLER, 2007).

Associados às fábricas de pré-fabricados, às empresas fornecedoras de concreto e a laboratórios, há também o resíduo de concreto obtido de ensaios de resistência à compressão e demais ensaios destinados ao controle tecnológico da qualidade do concreto. No caso das fábricas e empresas fornecedoras de concreto, é feito o controle dos corpos de prova moldados com o próprio concreto, agregando volume de um resíduo que é facilmente controlado e separado conforme necessidade (HAMAD, DAWI; 2017; TANGCHIRAPAT et al., 2013). O volume de resíduo gerado por esse procedimento é muitas vezes desconsiderado.

Porém, deve-se atentar ao fato de que o Brasil possui uma das normatizações mais exigentes e rígidas de controle do concreto. (PACHECO; HELENE, 2013). Dessa forma, conforme indica a NBR 12655 (ABNT, 2015), a cada lote de concreto são geradas amostras contendo pelo menos dois exemplares, o que acaba por somar diariamente grandes volumes de resíduos provenientes desse setor. Esse volume, por vezes pode ser reduzido ao considerar que nem todas as obras realizem o efetivo cumprimento da norma.

Para que se tornem agregados, os resíduos passam por um processo de tratamento composto basicamente por cominuição em britadores que podem ser de vários tipos e resultam em variadas formas de agregados, com diferentes propriedades físicas. Britadores de mandíbula são usados em geral como processamento primário, principalmente devido ao fato de poderem esmagar elementos de maiores dimensões. Já os britadores de impacto são utilizados como processamento secundário quando se deseja produzir agregados de maior qualidade, com forma mais cúbica, e com menor quantidade de argamassa aderida. (MATIAS et al., 2013). Esses dois tipos de britadores são os mais recorrentes em usinas de reciclagem brasileiras. (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009).

Jadovski (2005) apresenta, ainda: britadores giratórios que diminuem o concreto através da compressão; de cone que trabalham pelo atrito; de rolo que comprime através de fragmentação por clivagem, e moinho de martelo que produz em sua maior parte material de fração miúda. (CAVALHEIRO, 2011).

Além do formato e da quantidade de argamassa aderida que é alterada no processo de cominuição dos agregados, ocorre também o enfraquecimento da argamassa aderida. Isso porque durante o processo de cominuição do resíduo são geradas fissuras e trincas por toda a argamassa e, principalmente, na zona de transição existente, que é conhecida como uma região frágil do concreto. (SHI et al., 2016; KOU; POON, 2012).

2.1.2. Características do AGRC

A principal diferença entre agregados naturais e agregados reciclados é que o segundo possui uma argamassa aderida ao agregado gráudo natural. A argamassa aderida é o maior motivo da variabilidade de resultados em concretos que incorporam ARC, pois esse agregado pode ser proveniente de matrizes cimentícias diferentes, bem como ter passado por processos de cura diferentes (GONÇALVES et al., 2012a).

O teor de argamassa dos agregados gráudos reciclados pode estar entre 25% e 70%. Essa grande variação é devida ao concreto que originou o agregado, ao tamanho da partícula e

ao tipo de elemento estrutural (BEHERA et al., 2014). Concretos menos resistentes, ao serem cominuídos para tornar-se agregados têm sua argamassa mais fragmentada e boa parte dessa resulta em pó ou frações miúdas. O processo de cominuição também é responsável pelo maior teor de argamassa nas menores frações do agregado gráudo reciclado, como apresentam Xuan, Zhan e Poon (2016). Isso porque, durante o processo, há pequenas desfragmentação (5 a 10 mm) de partes da argamassa, enquanto que nas frações maiores do AGRC o agregado natural original ocupa a maior parte do volume do agregado que, por vezes, pode chegar a 90%. Por fim, o tipo de elemento de concreto também pode influenciar no teor de argamassa do AGRC, como é visto em Padovan (2013), onde o teor de argamassa determinado foi de 70% devido ao agregado ser provindo de laje pré-fabricada do tipo Roth.

Dessa forma, os valores de massa específica (M.E.) encontrados na bibliografia são influenciados tanto pela porosidade da argamassa quanto pela cominuição. Pois, quanto maior a porosidade da matriz cimentícia inicial (menor M.E.), menor será o teor de argamassa do agregado (maior M.E.). (BELIN et al., 2014). Na Tabela 2 são apresentados alguns valores de massa específica de agregados gráudos naturais e reciclados encontrados na bibliografia.

Tabela 2 – Massa específica de agregados gráudos naturais e reciclados

Massa específica		Fonte	Observação
AGN	AGRC		
2600	2400	Limbachiya, Leelawat e Dhir (2000)	10 mm
	2410		20 mm
2583	2356	Kou e Poon (2010)	10 mm
2662	2423		20 mm
2750	2500	Werle (2010)	AGRC de 18 MPa
	2470		AGRC de 37 MPa
	2490		AGRC de 50 MPa
2400	2330	Gonçalves et al. (2012b)	Laje cura convencional
	2370		Laje cura térmica
2687	2608	Matias et al. (2013)	Laje estádio 40 Mpa
2900	2580	Padovan (2013)	Laje pré-fabricada

Fonte: Fonte: Elaborada pela autora

Percebe-se que os valores de massa específica dos ARCs de Limbachiya, Leelawat e Dhir (2000) e Kou e Poon (2010) são aproximadamente 9% menores quando comparados aos agregados naturais. Em Matias et al. (2013), a diferença é de 10,5%, valor que também é encontrado nos trabalhos de Werle (2010). Em Gonçalves et al. (2012a), por outro lado, o agregado natural apresentou massa específica apenas 3% superior ao AGRC empregado, isso porque o AGN utilizado pelos autores possuía apenas 2,4 g/cm³, valor inferior ao comumente encontrado na bibliografia, que fica entre 2,5 g/cm³ e 2,7 g/cm³ para os autores citados.

Outras diferenças com relação aos AGRCs que também se destacam na bibliografia são a porosidade, a absorção de água, a resistência mecânica e a resistência à abrasão

2.1.2.1. Porosidade e absorção de água

Segundo Mehta e Monteiro (2015), a porosidade do concreto aumenta de forma inversamente proporcional à sua resistência e, com isso, agregados reciclados provindos de concretos com resistência baixa, apresentam maior porosidade, o que acarreta na maior absorção de água da mistura em que são inseridos.

Devido ao maior teor de argamassa, frações menores de AGRC possuem maior porosidade (XUAN; ZHAN; POON, 2016). Gómez-Soberón (2002) confirma isso ao caracterizar, através de porosimetria por intrusão de mercúrio, os agregados utilizados para execução de concretos. As porosidades encontradas são apresentadas na Tabela 3, onde percebe-se que também o agregado natural tem sua porosidade aumentada quando a fração granulométrica é menor. Vale ressaltar, porém, que se trata de uma rocha calcária que apresenta reduzida resistência sobre a geração de microfissuras durante o processamento.

Tabela 3 – Porosidades de agregados graúdos naturais e reciclados

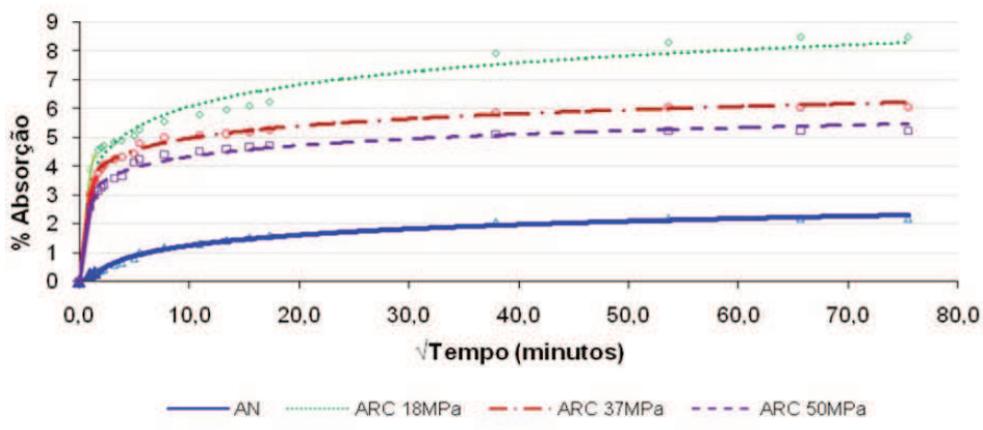
Tamanho da partícula	Agregado natural*	Agregado reciclado
Entre 5 e 12 mm	2,82%	14,86%
Entre 10 e 20 mm	2,70%	13,42%

* O agregado natural utilizado pelo pesquisador refere-se a uma rocha calcária

Fonte: Adaptado de Gómez-Soberón (2002)

A principal forma de apresentação da porosidade na bibliografia é através da absorção de água dos agregados, tendo em vista que esta é diretamente relacionada com a porosidade, ou seja, quanto mais aberta for a porosidade do agregado reciclado, maior também sua absorção de água. Dessa forma, quando comparados aos agregados naturais, a absorção dos ARCs apresenta valores muito maiores. De forma similar à porosidade, quanto maior a resistência do concreto que deu origem ao agregado, menor será sua absorção de água, conforme apresentado na Figura 1. Assim, a trabalhabilidade de concretos que incorporam ARC é mais afetada quanto menor for a resistência do concreto que originou o agregado (WERLE et al, 2010).

Figura 1 – Absorção por imersão de agregados graúdos ao longo de 72 horas



Fonte: Werle et al. (2010, p. 6)

As taxas de absorção de água de agregados reciclados encontradas na bibliografia apresentam grande variabilidade, isso se deve, como comentado anteriormente, às variadas fontes que originam o agregado, ao processo de cominuição e à fração granulométrica. A Tabela 4 apresenta alguns dos valores de absorção de água encontrados na bibliografia.

Tabela 4 – Absorção de água de agregados reciclados

Fração	Absorção (%)	Fonte	Concreto de origem
5-10 mm	7,20	Xuan, Zan e Poon, (2016)	Fornecido por empresa de concretagem
	6,40		Antiga estrutura demolida
	7,76	Kou e Poon, (2010)	Estrutura demolida de antigos edifícios
	7,60	Zhu et al. (2013)	Usina de reciclagem de RCD
	5,20	Limbachiya, Leelawat e Dhir (2000)	Elementos pré-moldados rejeitados
10-20 mm	6,40	Zhu et al. (2013)	Usina de reciclagem de RCD
	6,10	Xuan, Zan e Poon (2016)	Fornecido por empresa de concretagem
	5,50		Antiga estrutura demolida
	6,23	Kou e Poon, (2010)	Estrutura demolida de antigos edifícios
	4,90	Limbachiya, Leelawat e Dhir (2000)	Elementos pré-moldados rejeitados
Total fração graúda	10,47	Gonçalves et al. (2012b)	Laje pré-fabricada de cura convencional (40 MPa)
	10,93		Estacas pré-fabricadas de cura térmica (45 MPa)
	7,00	Güneyisi et al. (2016)	Amostras de 20 MPa
	8,96	Fedumenti (2013)	Laje pré-fabricada
	8,06	Zhang et al. (2015)	Viga de 30 MPa
	8,70		Viga de 50 MPa
	5,61		Tangchirapat et al (2013)
	4,12	Matias et al. (2013)	Laje de estádio com fck superior a 40 MPa

Fonte: Elaborada pela autora

Verifica-se, pela Tabela 4, que as absorções de água apresentadas têm valores desde 4,12% até 10,93%, indicando as variadas características que o AGRC pode apresentar. Analisando-se particularmente o maior e o menor valor encontrados, percebe-se que a origem de ambos corresponde a um concreto com resistência superior a 40 MPa, o que deveria indicar um AGRC de melhor qualidade e menor absorção de água. Entretanto, como indicado em Padovan (2013), elementos pré-moldados podem apresentar altos teores de argamassa e, com isso, maior absorção de água, como é o caso do maior valor encontrado (GONÇALVES et al. 2012b). Já o resíduo empregado por Matias et al. (2013), com o menor valor de absorção de água, é proveniente de uma laje da demolição do Estádio José Alvalade, onde o elemento estrutural possuía aproximadamente 50 anos (SCP, 2017) e certamente apresentava uma porosidade característica bastante reduzida devido ao grau de hidratação elevado e à possibilidade de carbonatação, demonstrada por sua absorção, principalmente quando comparada ao elemento utilizado por Gonçalves et al. (2012b), que foi cominuído aos 28 dias de idade.

2.1.2.2. Propriedades mecânicas

As resistências mecânicas do ARC apresentam desempenho inferior aos agregados naturais devido à estrutura porosa da argamassa residual. McNeil e Kang (2013) estudaram a resistência à abrasão pelo método Los Angeles e mostraram que agregados reciclados perdem mais partículas finas se comparado ao agregado natural provindo de rocha basáltica. Os pesquisadores estudaram, também, o esmagamento desses agregados e encontraram valores, em média, de 23,6% para os AGRCs e de 14,4% para os agregados naturais, confirmando a maior resistência desses últimos. Amer et al. (2016) também realizaram o ensaio de abrasão pelo método Los Angeles e encontraram valores ainda maiores: 51,5% para o AGRC e 38,9% para o AGN.

Tabsh e Abdelfatah (2009) também estudaram a dureza e solidez de agregados reciclados provindos de diferentes fontes. Os autores confirmam que os ARCs apresentam menores resistências mecânicas quando comparados aos agregados naturais. Porém, afirmam que os resultados encontrados para os ARC permanecem dentro dos limites aceitáveis.

O valor de esmagamento dos agregados foi verificado em Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001) para a execução de concretos. Os autores encontraram o percentual de 23,1% para o AGRC e de 15,7% para o agregado natural (basalto). Em Xuan, Zan e Poon (2016) que utilizaram granito como AGN, esse percentual ficou em 18% e, para o AGRC, em 27,8%.

Younis e Pilakoutas (2013) afirmam, a partir de uma série de dados coletados, que a densidade de agregados reciclados tem uma relação direta com sua resistência mecânica, que foi avaliada através do método de abrasão de Los Angeles. Ou seja, quando a densidade das partículas diminui, a resistência também diminui e isso está atrelado à uma maior porosidade e absorção de água.

2.1.3. Concretos com AGRC

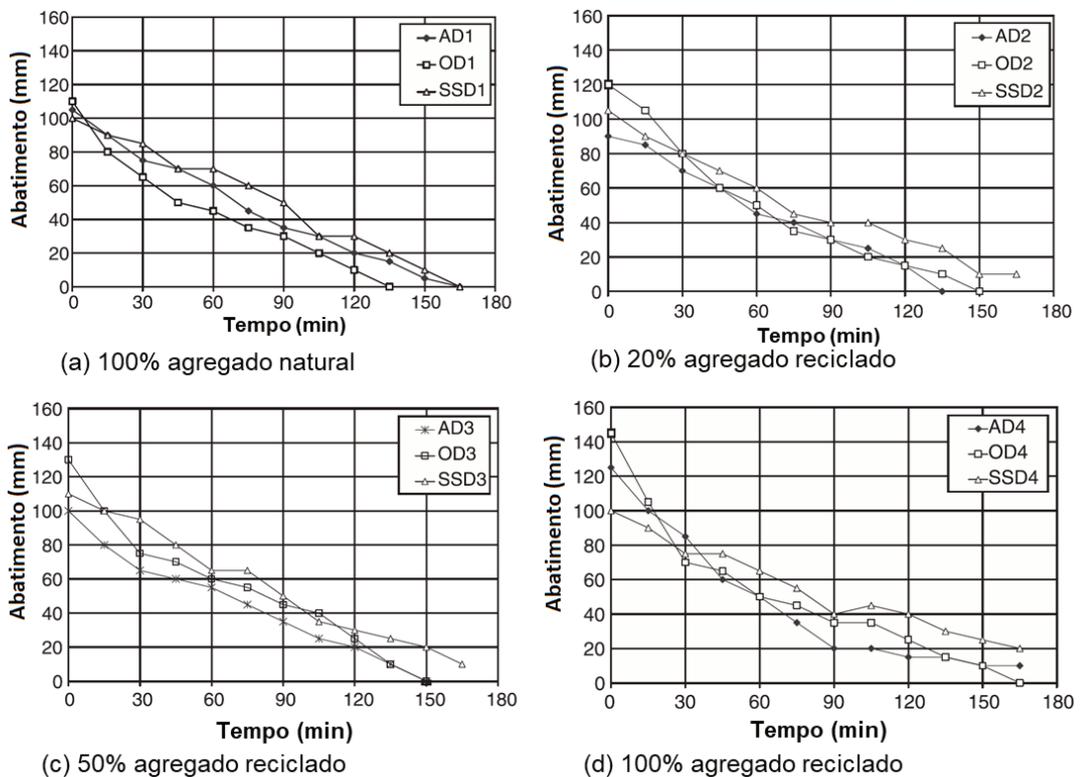
A presença de agregados reciclados em concretos resulta em uma série de alterações quando comparados a concretos constituídos por agregados naturais. As mudanças se dão tanto no estado fresco quando no estado endurecido e são causadas devido à estrutura e composição diferentes que o agregado graúdo reciclado de concreto tem em relação ao agregado natural.

2.1.3.1. Estado fresco

A maior absorção de água dos ARCs em relação aos agregados naturais faz com que ocorra a remoção da água disponível para a trabalhabilidade, reduzindo a consistência do concreto.

Poon et al. (2004) analisaram a perda de abatimento de concretos durante 165 minutos e realizaram concretos com 0%, 20%, 50% e 100% de AGRC, inserindo estes na mistura em três condições de umidade: seco em estufa (OD), seco ao ar (AD) e saturado com superfície seca (SSD). Houve ajuste do volume de água durante as misturas para alcance do abatimento inicial. Apresentando a Figura 2, os autores verificaram que houve um abatimento inicial maior quando os agregados estavam no estado OD, porém a perda de consistência destes foi mais rápida. Já para os estados AD e SSD, a perda de abatimento foi menor, principalmente para o SSD. Os concretos com agregados OD foram os que demandaram maior volume de água para ajuste de trabalhabilidade e esta água aumentou a consistência inicial, porém não foi suficiente para manter o abatimento devido à alta taxa de absorção dos agregados.

Figura 2 – Abatimento ao longo do tempo de concretos com 0%, 20%, 50% e 100% de agregados reciclados



Fonte: Traduzido de Poon et al. (2004, p. 34)

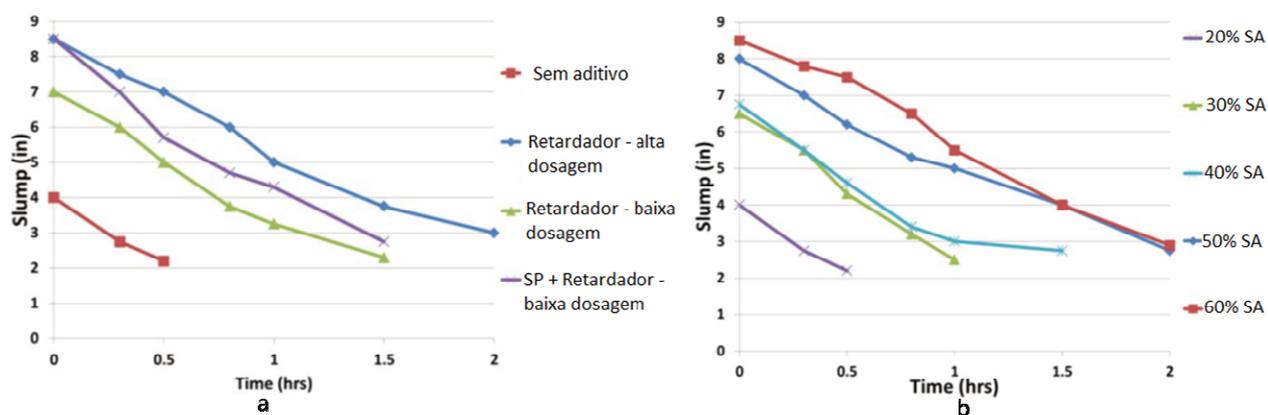
A necessidade de ajuste da consistência com água quando há a presença de AGRCs também foi relatada em Tangchirapat et al. (2013). Os autores utilizaram AGRCs secos ao ar e adicionaram 12,3% mais água nos concretos com AGRC em comparação aos concretos com AGN. A consistência inicial foi 16,7% maior para os concretos com AGRC, porém o tempo para que a consistência chegasse a zero foi de 90 minutos, enquanto que no concreto com AGN foi de 105 minutos.

Nesses trabalhos, verifica-se que a compensação de água durante a mistura do concreto possivelmente não passa a alterar a relação a/c efetiva deste, pois o AGRC estará absorvendo tal volume. Porém, é possível que ocorra aumento na porosidade devido à liberação do ar interno no agregado reciclado em forma de bolhas. (LEITE; MONTEIRO, 2016)

Nogueira (2015), por outro lado, ajustou o abatimento das misturas com aditivo superplastificante ao executar concretos com 50% de AGRC. O autor verificou que a inserção do agregado reciclado acarreta em redução média no abatimento de 21%. Na pesquisa também foi executada a resistividade elétrica no estado fresco das misturas e verificou-se que as maiores resistividades se dão para os concretos contendo AGRC. Isso porque o AGRC absorve mais água da mistura e acaba gerando uma solução com maior concentração de sólidos, o que impede a passagem de corrente elétrica e aumenta a resistividade.

Salas et al. (2013), ao realizarem concretos com 100% de AGRC, analisaram a influência do aditivo retardador de pega, da presença de sílica ativa (SA) e do uso combinado de aditivo retardador de pega e de aditivo superplastificante na perda de abatimento ao longo do tempo. Os resultados foram medidos em polegadas e o ensaio foi encerrado quando o abatimento chegou a 3 polegadas ou menos, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 – Abatimento de concretos com AGRC com aditivos e sílica ativa



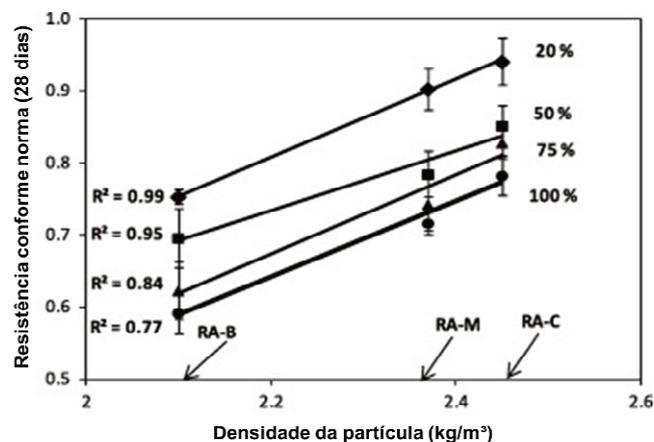
Fonte: Adaptado de Salas et al. (2013, p. 27 e 28)

Através da Figura 3 (a) é possível verificar que, quanto maior o teor de aditivo na mistura, maior será o abatimento inicial. Por outro lado, quando concretos com 100% de AGRC não possuem qualquer tipo de aditivo, o abatimento pode chegar a zero em apenas 30 minutos. Com relação à presença de sílica ativa, percebeu-se que quanto maior seu teor, maior também o abatimento inicial e a manutenção deste ao longo do tempo. Esse efeito pode ser devido à elevada área específica da sílica ativa, a qual acarreta em retenção de água da mistura devido à adsorção superficial, o que faz com que o abatimento seja mantido por maiores períodos.

2.1.3.2. Estado endurecido

McNeil e Kang (2013) executaram concretos com substituição de 0%, 15%, 30% e 50% de agregado natural por AGRC. Apesar da redução na resistência à compressão, encontraram valores melhores de resistência à tração na flexão para os concretos com AGRC. Os concretos contendo agregados reciclados (AR) executados por Younis e Pilakoutas (2013) também apresentaram redução na resistência quando comparados com os concretos de agregados naturais (AN). Os autores empregaram três tipos de agregados graúdos reciclados provindos de resíduos de construção e demolição: de concreto (RA-C), de alvenaria de tijolos (RA-B) e misto (RA-M). Na Figura 4 é apresentada a relação entre a densidade dos agregados reciclados e a resistência à compressão de norma dos concretos executados.

Figura 4 – Efeito da densidade de partícula do agregado reciclado sobre a resistência normalizada do concreto



$$\text{Onde } f_{c_{\text{norma}}} = \frac{f_{c_{28,AR}}}{f_{c_{28,AN}}}$$

Fonte: Traduzido de Younis e Pilakoutas (2013, p. 694)

Percebeu-se uma forte relação entre a densidade agregado empregado e a resistência à compressão normatizada (dividida pela f_c do concreto de referência, com AN). O comportamento geral é que o incremento de 8% na densidade do agregado reciclado gera um aumento de 10% na resistência do concreto, e isso se apresenta como tendência para todos os teores de substituição estudados. Resultados similares foram encontrados em Werle (2010), onde foram empregados AGRCs de 50 MPa, 37 MPa e 18 MPa. Para concretos com f_{cj} de 30 MPa, o AGRC de menor resistência acarretou em redução na resistência à compressão das misturas e o AGRC de 50 MPa não agregou, em média, as resistências finais dos concretos. Segundo a pesquisadora, quando a porosidade do AGRC é superior à da nova matriz cimentícia, são observados prejuízos no novo concreto, e não há diferenças visíveis entre o emprego de AGRC com porosidade superior (50 MPa) ou igual (37 MPa) à nova matriz cimentícia.

O aumento percentual da substituição do AGN por AGRC resultou em diminuição da resistência à compressão, como pode ser visto na Figura 4, e esse efeito também foi percebido em relação à resistência à carbonatação em Xiao, Lei e Zhang (2012). Para estes, a substituição de 30%, 50% e 70% de AGN por AGRC causou aumento na profundidade de carbonatação de forma que, com 70% de AGRC a carbonatação foi o dobro do concreto sem agregados reciclados. Um efeito reverso, no entanto, ocorreu quando o concreto foi composto por 100% de AGRC, onde a carbonatação foi 23% maior que o concreto de referência. Esse aumento não foi percebido em Sartori et al. (2017), onde os autores executaram concretos com 0%, 25% e 50% e não perceberam uma tendência de aumento da carbonatação.

Por outro lado, o que foi verificado tanto no trabalho de Xiao, Lei e Zhang (2012) quanto em Sartori et al. (2017) é que a presença de materiais cimentícios suplementares (MCSs) acarreta no aumento médio da taxa de carbonatação dos concretos, independente do teor de AGRC. Isso porque os MCSs geram uma diminuição dos poros da argamassa e consomem os produtos carbonatáveis, levando a uma evolução mais rápida da carbonatação nos poros do concreto. Esse efeito, foi visto também para a absorção de água por capilaridade, onde a presença de cinza de casca de arroz, no trabalho de Fedumenti (2013), acarretou no aumento da absorção capilar em concretos com e sem AGRC. Para concreto sem MCSs, Werle (2010) conclui que a redução da porosidade do AGRC reduz também a absorção capilar. Segundo esta, a inserção de AGRC mais poroso acarreta no aumento da porosidade do concreto final, incluindo os poros capilares, resultando no aumento da absorção capilar.

As zonas de transição (ZT) antiga e nova existentes em concretos que incorporam AGRC foi estudada por Xiao et al. (2013) através da nanoindentação. Segundo os autores, aos

7 dias o módulo de indentação da nova ZT representava 95% do módulo da nova pasta de cimento e essa região apresentava uma espessura de aproximadamente 85 μm . Para os 28 dias, os módulos de indentação tanto da nova ZT quanto da nova pasta de cimento tiveram seu valor triplicado e a relação entre módulo ZT e módulo pasta passou para 90%, sendo que a espessura foi reduzida para 60 μm . A antiga ZT, por outro lado, não apresentou alterações ao longo do tempo, tendo 80% do valor de módulo da antiga pasta de cimento e espessura aproximada de 50 μm . Uma última análise, aos 90 dias, revela a tendência de melhoria, mesmo que reduzida, da nova ZT. Por fim, as ZT antiga e nova apresentam espessuras entre 40-50 μm e 55-65 μm , respectivamente.

Possivelmente, devido à maior absorção de água do AGRC, a película de água que é gerada em torno dos agregados no estado fresco passa a ser diminuída nos agregados reciclados, reduzindo a espessura dessa zona de interface caracterizada por ser uma região mais frágil nos concretos. Já a ZT antiga existente nos AGRCs mantém-se com espessura e módulos similares aos inicialmente verificados caso não ocorra um tratamento prévio desse agregado.

2.1.4. Normas para emprego do AGRC

Muitos países criaram normas com vistas à determinação dos percentuais máximos, bem como algumas propriedades que devem ser respeitadas para a utilização de agregados reciclados em concretos. Na Tabela 5 são apresentadas algumas normas que padronizam características de agregados reciclados a serem utilizados em concretos. Nesta tabela foram excluídos os agregados miúdos e de alvenaria comumente apresentados na bibliografia em conjunto com os agregados graúdos de concreto. São utilizados os termos ARC e ARM para agregados reciclados de concreto e agregados reciclados mistos, respectivamente. Estes últimos foram mantidos apenas para o Japão devido à sua grande exigência quanto à qualidade do resíduo, superior à grande parte das normas dos demais países. As denominações “ARC-I” e “ARC-II” foram inseridas porque a Alemanha e Portugal permitem tornar agregado reciclado duas classes de resíduos de concreto.

Tabela 5 – Especificações internacionais para o uso do agregado reciclado de concreto

País	Norma (ano)	Classe	Dens. Mín (kg/m ³)	Máx Abs. Água (%)	Substituição máxima (%)	Emprego	Resist. Máx. (MPa)						
Alemanha	DIN 4226-100 (2002)	ARC-I	2000	10	20-35	Concreto estrutural	C30/37 (20% subs)						
		ARC-II	2000	15	20-35		C25/30 (35% subs)						
Bélgica	TRA 550 (2004)	ARC	-	-	20	Interiores e aplicações não perigosas	C16/20						
Brasil	NBR 15116 (2004)	ARC	s.e.	7	100	Concreto não estrutural	15						
Dinamarca	DS 2426 (2009)	ARC	2200	s.e.		Ambientes não agressivos	C40						
Espanha	EHE 08 Anejo 15 (2008)	ARC	2300 ^a	5,5 ^b	20	Concreto estrutural	40						
Holanda	NEN 5905 (2010)	ARC	2000	s.e.	100	Ambientes não agressivos	C40/50						
Hong Kong	WBTC 12 (2002)	ARC	2000	10	20	Concreto estrutural	C35						
					100		C20						
Japão	BCSJ (2005)	ARM	2200	7	100	Concreto não estrutural	18						
							JIS A 5021 (2005)	ARM	2500	3	s.e.	Sem limitações	45
							JIS A 5022 (2005)	ARM	2300	5	s.e.	s.e.	s.e.
							JIS A 5023 (2005)	ARM	s.e.	7	s.e.	Reaterros, nivelamentos	s.e.
Noruega	NB 26 (2003)	ARC	2000	10	-	-	-						
Portugal	LNEC E 471 (2009)	ARC-I	2200	7	25	Concreto estrutural	C40/50						
		ARC-II	2200	7	20		C35/45						
Reino Unido	BS 8500-2 (2006)	ARC	s.e.	s.e.	20	Concreto estrutural	C40/50						
RILEM	TC 121-DRG (1994)	ARC	2000	10		Ambientes secos e molhados não agressivos	C50/60						
Suíça	SAI 2030 (2010)	ARC	s.e.	s.e.	100	Concreto reforçado	C30/37						

s.e.: sem especificação

^a Refere-se à densidade final do concreto com AGRC

^b Aos 10 minutos de ensaio

Fonte: Adaptado de Kiouranis, Miranda e Melo Neto (2016, p. 4214 a 4218), Vyncke e Vrijders (2010, p. 5) e CPH (2008)

Segundo Vyncke e Vrijders (2010), a TRA 550 (CRIC 2004) é de fato uma prescrição técnica que vem sendo adotado para concretos em empresas privadas com o objetivo de obter o rótulo “BENOR”. Isso porque a normatização técnica do país não faz qualquer menção quanto a porcentagens de substituição, características e emprego de agregados reciclados,

apenas atribui a classificação quanto à composição. Ainda assim, conforme citam os autores, algumas empresas já possuem estrutura de reciclagem organizada e podem entregar, para obras privadas, concretos contendo até 90% de agregados reciclados.

Verifica-se que na maioria dos países há uma exigência mínima de massa específica de 2000 kg/m³ para que o agregado reciclado seja empregado em concretos. Tal especificação não é encontrada na norma brasileira, porém esta também não permite que os agregados sejam utilizados em concretos estruturais. A japonesa JIS A 5023 possui uma classe de resíduos que também não exige valor mínimo de massa específica, entretanto, tais resíduos podem ser destinados apenas a reaterros e nivelamentos. Já o Reino Unido e a Suíça permitem que agregados provindos de resíduos de concreto sejam utilizados em concretos estruturais sem que atendam a padrões de massa específica e absorção de água.

Quanto à absorção de água, verificam-se valores entre 3% e 15%, sendo que quanto maior esta característica no ARC, maior também a restrição quanto ao emprego em concretos. A norma WBTC 12 de Hong Kong, por exemplo, permite absorção de água do ARC de até 10%. Nesta, para um percentual de substituição de 100% do agregado natural pelo reciclado, permite-se a execução de concretos com até 20 MPa. Para uma substituição de 20%, a resistência permitida aumenta para 35 MPa. Dentre as normas apresentadas, a mais exigente quanto à absorção de água é a japonesa JIS (2011) “classe H”, que determina um valor de absorção de água máximo de 3%.

O teor de substituição permitido na maioria das normas é entre 20% e 35% e, para esses, é permitido o uso dos agregados em concretos estruturais com resistências até 50 MPa. Quando o teor de substituição aumenta para 100%, passam a haver restrições quanto ao ambiente em que a estrutura é destinada, à função estrutural do concreto e as classes de resistência diminuem para 20 MPa, com exceção da Suíça. O Brasil apresenta-se como o único que não possui normatização que permita o uso de ARC em concretos estruturais.

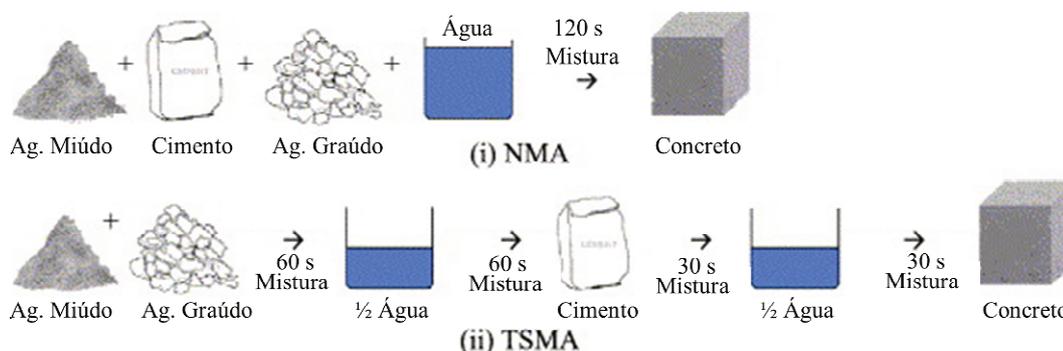
2.2. Formas de mitigação da absorção de água do ARC

Algumas pesquisas vêm estudando formas de minimizar essa característica de grande absorção de água do agregado reciclado de concreto. Entre essas, destacam-se a pré-molhagem, o tratamento superficial com pasta de cimento e de cimento com pozolana, tratamento superficial com hidrofugante e parafina e também a carbonatação como forma de preenchimento de poros do agregado.

2.2.1. Procedimentos de mistura

Tam, Gao e Tam (2005), alteraram o método de mistura tradicional (NMA) do concreto que utilizavam, onde juntavam todos os materiais e misturavam por 120 segundos. A mudança realizada foi a separação do processo em dois estágios (TSMA), onde primeiramente foi realizada uma homogeneização por 60 segundos de todos os agregados (miúdos e graúdos) e, então, adicionado metade da água de abatimento, mantendo a mistura por mais 60 segundos e, por fim, adicionado o cimento e misturado por mais 30 segundos. O segundo estágio consistiu e adicionar a outra metade da água, misturando por mais 30 segundos. Ambos processos são ilustrados pelos autores conforme a Figura 5.

Figura 5 – Formas de mistura tradicional (NMA) e em dois estágios (TSMA) do concreto



Fonte: Adaptado de Tam, Gao e Tam (2005, p. 1197)

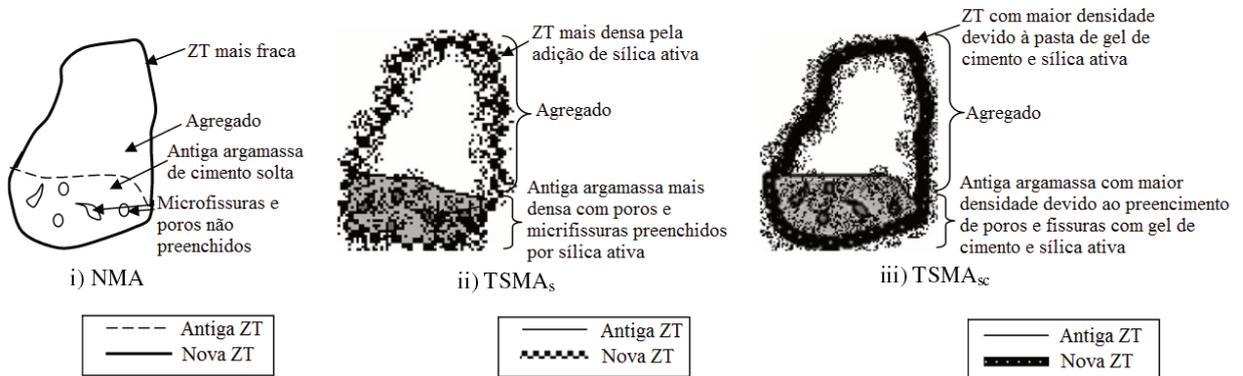
Os autores concluem que houve o fortalecimento do AGRC, a partir do TSMA, devido à pasta de cimento que aderiu à superfície do agregado e penetrou nas fissuras e antiga ZT. Com isso, formou-se uma melhor microestrutura no AGRC, resultando em um aumento da resistência à compressão de 20,64% nos concretos contendo 25% de AGRC

Baseados nesse método, Kong et al. (2010) empregaram um método de mistura tripla (TM), onde todos os agregados eram primeiramente misturados com parte da água, então era adicionada apenas a adição mineral (cinza volante e escória) e, por fim, o cimento e o restante da água. Os autores verificaram que este método gera melhorias ainda maiores na resistência mecânica e na durabilidade dos concretos devido a reação pozolânica da cinza volante e da escória com o hidróxido de cálcio presente nos poros e na superfície do AGRC.

Tam e Tam (2008) propuseram uma melhoria no método TSMA. Nesta pesquisa, os autores realizaram uma pré-mistura apenas do AGRC presente na mistura e do cimento e água proporcionais ao percentual de AGN substituído (5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%). A segunda etapa constituiu da adição do restante dos materiais para finalização da mistura. A

essa modificação, foi dado o nome de TSMAC. Foi, ainda, estudada a substituição de 2% de cimento por sílica ativa (TSMAsc), a qual foi adicionada proporcionalmente nas duas etapas de mistura. As melhorias obtidas no AGRC são ilustradas pelos pesquisadores conforme a Figura 6, onde é indicado o fortalecimento tanto das ZTs quanto da argamassa aderida presente no AGRC.

Figura 6 – Estrutura do AGRC empregando mistura i) normal (NMA); ii) em duas etapas, com sílica ativa; e iii) em duas etapas, com sílica ativa e cimento



Fonte: Adaptado de Tam e Tam (2008)

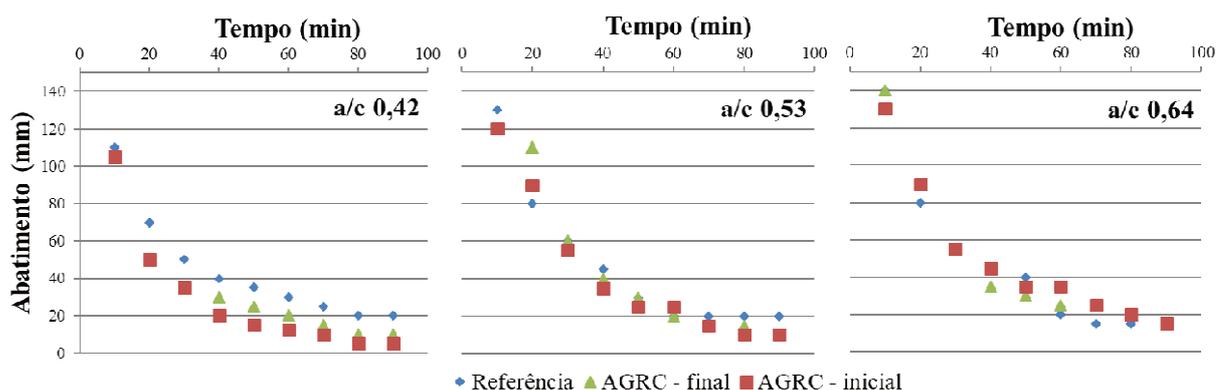
Tais conclusões se deram a partir de imagens de MEV, onde é verificada a melhoria das ZT antiga e nova, e dos resultados positivos de densidade e resistência mecânica dos concretos. Para um percentual de 25% de AGRC, os concretos apresentam resistência mecânica 19,5% superior com a TSMAC e 19,7% com a TSMAsc quando comparados aos concretos de mistura tradicional.

O método TSMAsc foi empregado também por Salas et al (2013), porém os autores primeiramente homogeneizaram por um minuto todos os ARCs (fração miúda e graúda) juntamente com os materiais cimentícios (cimento e MCSs) para, então, adicionar metade da água e misturar por um minuto. Na segunda etapa, foram inseridos os agregados naturais, o restante da água e misturado por 2 minutos. O abatimento inicial das misturas realizadas pelo método TSMAsc foi quase 3 vezes superior às misturas realizadas pelo método tradicional. Já a resistência à compressão teve um acréscimo de 6,36% com a mudança na mistura.

Nogueira (2015), realizou alteração apenas no momento de mistura do AGRC, mantendo o restante do procedimento igual. Neste trabalho, foi inserido primeiramente o agregado graúdo com 1/3 da água, então o cimento + 1/3 da água, por fim é inserido o agregado miúdo com o restante da água. A alteração feita foi que, ao invés de inserir o AGRC no início da mistura, juntamente com o AGN, adicioná-lo ao final da mistura, após a

homogeneização de todos os materiais. Segundo o autor, dessa forma os agregados têm menos tempo para absorver a água de abatimento da mistura. Além disso, já iniciou a dissolução do cimento, tornando a pasta mais viscosa e dificultando a absorção. O abatimento ao longo do tempo das misturas executadas é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Abatimento de concretos com AGRC inseridos no início e no fim da mistura



Fonte: Adaptado de Nogueira (2015, p. 73 e 74)

Percebe-se que, independente do momento de inserção do AGRC na mistura, as curvas se apresentam similares. Porém, analisando-se mais detalhadamente, algumas diferenças são percebidas e verifica-se que a inserção do AGRC ao final da mistura resultou em maiores abatimentos, o que levou o método de mistura a apresentar influência significativa quando realizada análise estatística para o abatimento inicial. Quanto à resistência à compressão, a mistura AGRC-final apresentou os maiores valores, indicando que houve fortalecimento da argamassa pela redução da relação a/c causada pela maior absorção de água do AGRC.

Outra alteração que é largamente realizada na mistura de concretos para mitigar os efeitos da absorção dos agregados reciclados é o método onde se faz adição de água para alcance do abatimento, também conhecido como compensação de água. Neste, se destacam os métodos que compensam água após a mistura de todos os materiais até o alcance do abatimento desejado, como o executado por Poon et al. (2004). Leite e Monteiro (2016) demonstram, porém, que ao inserir AGRCs completamente secos na mistura, o ar presente nos poros desses agregados passa a ser liberado na mistura ao mesmo passo que a água da mistura é absorvida. A maior parte desse ar liberado pelos AGRCs permanece aprisionado no concreto, gerando aumento da porosidade e redução da resistência mecânica.

Fedumenti et al. (201) evitaram isso ao realizar a compensação de água antes mesmo de iniciar a mistura, colocando o AGRC, 50% da água absorvida pelos agregados aos 10 minutos de absorção (6%) e ainda 10% da água de amassamento. Isso foi mantido por dez

minutos e, então, foi iniciada a mistura do concreto. Nesse processo, o ar presente no interior dos agregados pode ser liberado para o ambiente externo, evitando os vazios no produto final.

Similar a esse processo, tem-se também a pré-molhagem dos agregados reciclados, que será apresentada no próximo item (2.2.2).

2.2.2. Tratamento do ARC

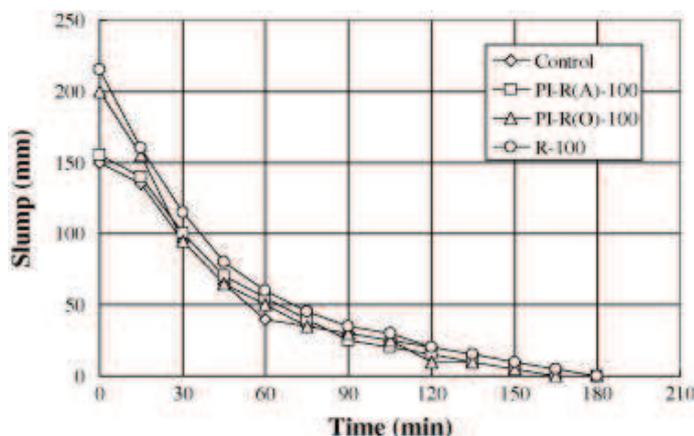
A pré-saturação, ou pré-molhagem, do AGRC foi analisada por Padovan (2013), onde a autora avaliou a perda de abatimento em concretos com substituição de 50% de AGN e três relações a/c iniciais: 0,45, 0,55 e 0,65. Os teores de pré-molhagem estudados foram de 40%, 60%, 80% e 100% e os resultados mostraram que quanto maior o esse valor, menor era a perda de abatimento. Padovan (2013) conclui que um teor ideal de pré-molhagem para minimizar a perda de abatimento em concretos com AGRC é em torno de 60% a 80%.

Werle (2010) também realizou pré-molhagem de AGRCs para a confecção de concretos e, tendo fixado um abatimento de 100 ± 20 mm, foi necessário adicionar água nas misturas onde a pré-molhagem foi de 0% a 50% e quando a pré-molhagem foi de 75% e 100%, ocorreu efeito contrário, tendo sido necessário adicionar menos água na mistura do que o previsto. Assim, percebe-se que a pré-molhagem é uma forma eficaz de reduzir a absorção de água do concreto pelo AGRC.

Concordando com Padovan (2013), Etxeberria et al. (2007) recomendam um nível de umidade dos agregados reciclados de 80% para que não ocorra alteração na relação a/c efetiva do concreto. Segundo os autores, teores abaixo disso acarretam na absorção de água da mistura, reduzindo a relação a/c e a trabalhabilidade. Por outro lado, em teores acima de 80%, passa a ocorrer falha na zona de transição entre agregado e nova matriz cimentícia, minimizando a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos.

Kou e Poon (2010), ao analisar o tratamento de AGRCs com álcool polivinílico, também verificaram redução significativa na absorção de água dos agregados: de 6,23% para 2,39%. Após o tratamento, o AGRC foi seco ao ar (PI-R(A)) e em estufa a 60° C (PI-R(O)) e, então, foram realizadas as misturas de concreto. Na Figura 8 é representado o abatimento ao longo do tempo dos concretos estudados, sendo “Control” o concreto contendo apenas agregados naturais e R-100 o concreto de referência, com agregados que não passaram pelo tratamento.

Figura 8 – Abatimento de concretos com AGRC tratado com álcool polivinílico



Fonte: Kou e Poon (2010, p. 652)

Os autores comentam que o aumento no abatimento inicial do concreto de referência se deu pela necessidade de adição de água no concreto durante a mistura, devido à maior absorção desse agregado. Essa água adicional foi, também, a que manteve o abatimento acima dos demais por todo o período de ensaio. Nota-se, entretanto, que as curvas de abatimento se mostram de forma similar para todos os concretos. As resistências à compressão dos concretos com agregados tratados e secos em estufa e secos ao ar foram superiores às do concreto de referência em 1% e 5%, respectivamente. No ensaio de penetração de cloretos, por outro lado, as diferenças foram superiores, tendo o concreto com agregados tratados melhorado os valores em mais de 32% em comparação ao concreto com AGRC referência.

A utilização de produtos hidrofugantes segundo Spaeth e Tegguer (2014) gera um filme polimérico que repele a água e, com isso, consegue reduzir de forma tão significativa essa característica do agregado reciclado. Ao utilizar silano e siloxano como forma de tratamento dos agregados reciclados, além absorção de água ter sido reduzida em menos da metade, o coeficiente de abrasão de Los Angeles dos agregados foi reduzido em 22%. Dessa forma, além da ação hidrofugantes, os autores concluem que a fixação dos polímeros nos poros do AGRC gera uma microestrutura mais densa.

Diferenças entre a ação de agentes hidrofugantes foram identificadas em Santos et al. (2017) ao imergirem amostras de ARC em silano e parafina. Após o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, os autores verificaram que o silano preenche principalmente os poros menores de 100 nm, enquanto que a parafina ocupa quase todos os poros acima de 100 nm. A porosidade total foi reduzida em quase 70% nos ARCs tratados com parafina, enquanto que o silano reduziu 30% desse valor. Como consequência do tratamento, a absorção de água dos agregados também foi reduzida em 83% com a parafina e em 46% com o silano.

Apesar dos benefícios na porosidade e absorção de água dos agregados, Santos (2016) verificou que o tratamento dos agregados acarreta na redução da resistência mecânica de argamassas que o empregam. A resistência à compressão foi reduzida em 53% para o agregado tratado com parafina e 28% para o agregado tratado com silano. A pesquisadora conclui que esses tratamentos se mostram economicamente e ambientalmente inviáveis.

Shi et al. (2016) discorrem que os tratamentos que empregam hidrofugantes trazem melhorias para o agregado reciclado, porém gera prejuízos nas propriedades mecânicas. Um dos motivos disso pode ser que os grupos poliméricos da superfície do agregado passem para a pasta durante a mistura da argamassa ou do concreto e envolvam os grãos de cimento, dificultando sua hidratação. Outro motivo é que pode ocorrer o enfraquecimento da zona de transição devido ao efeito hidrófugo, que acaba por interferir na ligação entre agregado e matriz cimentícia.

Outros estudos, ainda, realizaram a carbonatação e a impregnação com pozolanas. Esses métodos serão tratados nos itens 2.3.4 e 2.4.2, respectivamente.

2.3. Carbonatação do concreto

A carbonatação do concreto envolve uma série de reações físicas e químicas relacionadas tanto aos gases presentes na atmosfera quanto aos produtos de hidratação do cimento. Esta pode ser influenciada por fatores ambientais, como temperatura, umidade e concentração de gás carbônico no ambiente, e também por fatores intrínsecos do concreto, como sua composição e forma de cura. O concreto, após a carbonatação, apresenta algumas alterações características quanto à porosidade e resistência.

2.3.1. Reação da carbonatação no concreto

Em misturas de concreto de cimento Portland, durante a hidratação do clínquer ocorre a formação de produtos insolúveis como os silicatos (C-S-H) aluminatos (C-A-H) e silicoaluminatos (C-A-S-H), e também de alcalinos solúveis, como o Ca(OH)_2 , NaOH e KOH. A carbonatação ocorre lentamente entre esses produtos alcalinos, que estão presentes nos poros do concreto, e os gases presentes no ambiente, principalmente o CO_2 . (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Papadakis, Vayenas e Fardis (1991) explicam detalhadamente cada reação envolvida durante a carbonatação e descrevem, ainda, as taxas nas quais estas ocorrem. Thiery (2005)

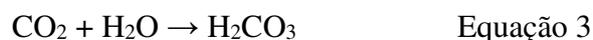
ainda detalha as etapas de dissolução do Ca(OH)_2 sólido e do CO_2 gasoso na solução aquosa dos poros do concreto. As reações descritas pelos pesquisadores são:

1. Primeiramente ocorrem as reações químicas que produzem os materiais carbonatáveis (Equação 1 e Equação 2)

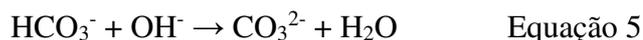
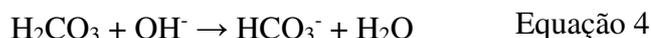


2. O CO_2 da atmosfera penetra nos poros do concreto e ocorre sua difusão;

Dissolução do CO_2 em água, tornando-se ácido carbônico;



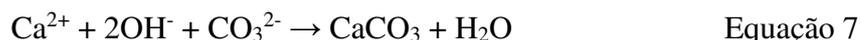
Na água, o H_2CO_3 se comporta como um diácido fraco cuja dissociação ocorre em duas fases, designadas pelas reações apresentadas na Equação 4 e na Equação 5;



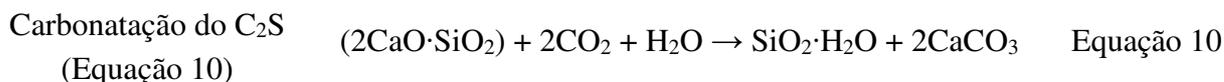
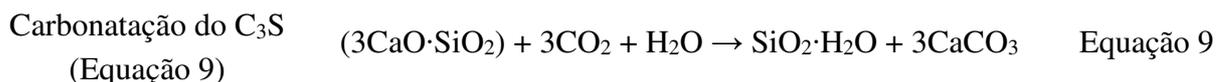
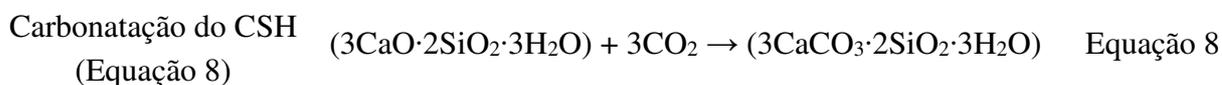
3. O Ca(OH)_2 é dissolvido e ocorre sua difusão na fase aquosa dos poros (Equação 6),



4. O CO_2 dissolve-se na água dos poros e reage com o Ca(OH)_2 dissolvido (Equação 7);



5. Ocorre a reação do CO_2 com outros constituintes carbonatáveis sólidos da pasta de cimento endurecida;



6. O volume de poros do concreto é reduzido devido aos produtos sólidos de hidratação e carbonatação;

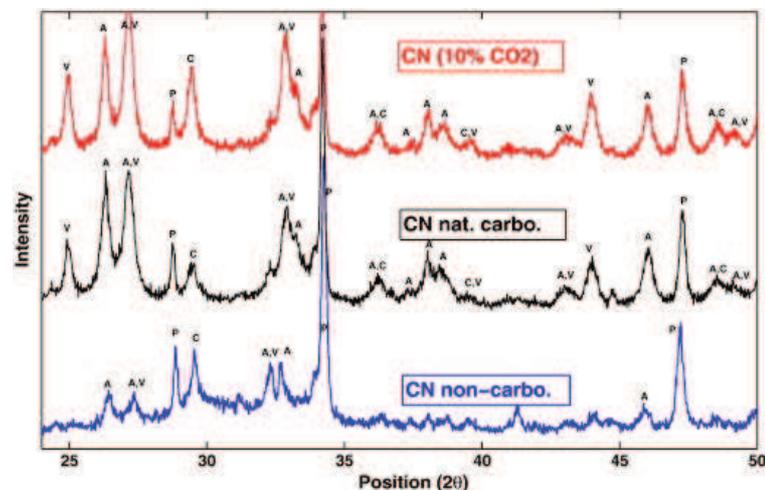
Os autores ainda indicam como uma sétima etapa da carbonatação a condensação de vapor de água nas paredes de poros de concreto.

Durante a carbonatação são gerados três tipos de CaCO_3 : calcita, vaterita e aragonita e, segundo Goto et al. (1995), compostos de cálcio em geral presentes no concreto (Ca(OH)_2 , $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) reagem com o CO_2 formando produtos de carbonatação sólidos, em especial o C_2S e o C_3S , que resultam em carbonatos de alta resistência, confirmando a 5ª etapa descrita por Papadakis, Vayenas e Fardis (1991) no processo de carbonatação.

Mo et al. (2017) verificaram isso ao realizar cura de concretos por carbonatação acelerada sob pressão. A zona de transição entre agregado e pasta apresentou menor porosidade em relação ao concreto submetido à cura convencional. Ao analisarem a região, os pesquisadores identificaram a calcita como responsável pelo preenchimento dos poros.

Morandea, Thiéry e Dangla (2014), por outro lado, apresentam o DRX de pastas de cimento carbonatadas a 10% de CO_2 , carbonatadas ao natural e não carbonatadas que indicam a presença das três formas de CaCO_3 em todas as pastas carbonatadas.

Figura 9 – Comparação de DRX para pastas de cimento não carbonatadas, carbonatadas ao natural e carbonatadas a 10% de CO_2



A: aragonita; V: vaterita; C: calcita; P: portlandita

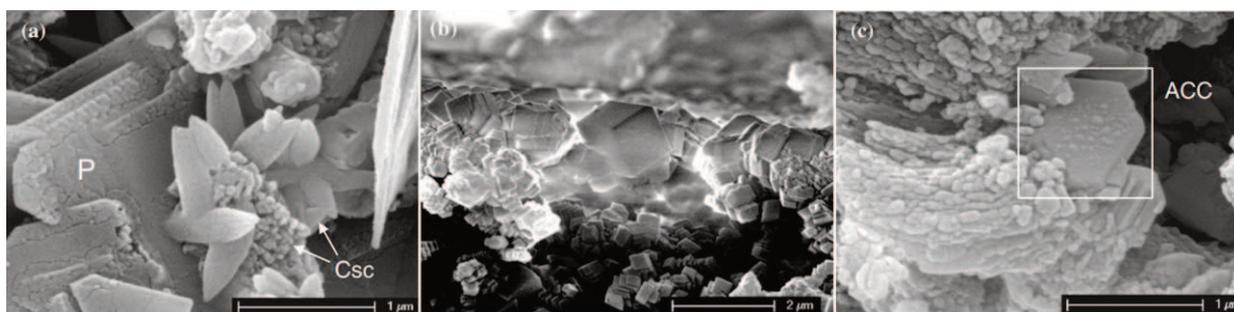
Fonte: Morandea, Thiéry e Dangla (2014, p. 162)

Tai e Chen (1998) afirmam que, em temperatura ambiente, a formação cristalina do carbonato de cálcio varia conforme o pH da solução, sendo que quando o pH está acima de 12 forma-se principalmente a calcita, em pH em torno de 11 são formadas principalmente aragonitas, e em pH abaixo de 10 a vaterita é o principal produto. A presença de outros elementos na solução, como o manganês, magnésio e fosfato, também favorece a formação de aragonita e calcita.

A calcita é a forma mais estável do CaCO_3 em temperatura e pressão ambientes e, apesar do formato geralmente romboédrico, ela é encontrada também no formato escalenoédrico, romboédrico agudo prismático e tubular em pesquisas, além de poder apresentar mais de 620 configurações na natureza. A aragonita apresenta-se sob a forma de prismas ou cristais semelhantes a agulhas e a vaterita costuma formar esferulitos policristalinos. (CIZER et al., 2012).

A partir da carbonatação natural e acelerada de pastas de cal hidratada, Cizer et al. (2012) apresentam três formatos de calcita encontrados (Figura 10). Com a carbonatação natural, os formatos de calcita mais encontrados pelos autores foram escalenoedros (Figura 10 (a)) e esférulas amorfas (Figura 10 (c)). Quando realizada a carbonatação acelerada, foram encontradas calcitas em formato romboédrico (Figura 10 (b)) próximas à superfície e em formato escalenoédrico após certa profundidade (600 μm).

Figura 10 – Formatos de calcita encontrados em pasta de cal após carbonatação acelerada (b) e natural (a e c): (a) escalenoedro; (b) romboédrico; (c) amorfo ou em esférulas.



P: portlandita; Csc: cristal escalenoedro de calcita; ACC: Carbonato de cálcio amorfo.

Fonte: Adaptado de Cizer et al. (2012, p. 6155 e 6158)

2.3.2. Fatores que determinam a velocidade de carbonatação

A equação de para previsão de carbonatação mais simplificada e amplamente utilizada na literatura (ASHRAF, 2016) é a modelada por Tuutti (1982) e apresentada pela Equação 11.

$$e = k\sqrt{t} \quad \text{Equação 11}$$

Neste, o e representa a profundidade de carbonatação, o t representa o tempo de exposição do elemento de concreto e o k é o coeficiente de carbonatação do concreto que passa a ser regido por diversos fatores, extrínsecos ao concreto e intrínsecos. Ou seja, o coeficiente de carbonatação é que vai indicar a velocidade do processo e vai variar de acordo

com a temperatura, umidade relativa e concentração de gás carbônico no ambiente de exposição (fatores extrínsecos) e também com a composição e características e composição do concreto, bem como pelo processo de cura pelo qual esse elemento passou (fatores intrínsecos).

2.3.2.1. Temperatura

A velocidade em que reações químicas ocorrem varia com relação à temperatura ambiente em que estão inseridas. À medida que a temperatura aumenta, ocorre o afastamento das moléculas e a energia intermolecular aumenta, acarretando em reações mais rápidas (ATKINS; JONES, 2012).

Com relação à carbonatação, a literatura expõe que a variação de temperatura entre 20 e 40 graus não exerce influência significativa sobre a reação (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991). Ashraf (2016) apresenta uma série de trabalhos que realizaram carbonatação acelerada e verifica-se que a maioria emprega a temperatura de 20° C, sendo que os demais trabalhos utilizaram temperaturas de 21° C a 25° C. Em trabalhos nacionais, verifica-se a utilização de temperaturas na faixa dos 20° C aos 27° C, sendo que a maior parte dos trabalhos emprega 25° C para carbonatação. (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007).

Com relação ao tipo de CaCO_3 formado, altas temperaturas de carbonatação têm a aragonita como principal produto formado quando o pH está abaixo de 12. Em temperatura ambiente, o pH da solução dos poros do concreto influencia significativamente o tipo de carbonato precipitado. (TAI; CHEN, 1998).

2.3.2.2. Umidade

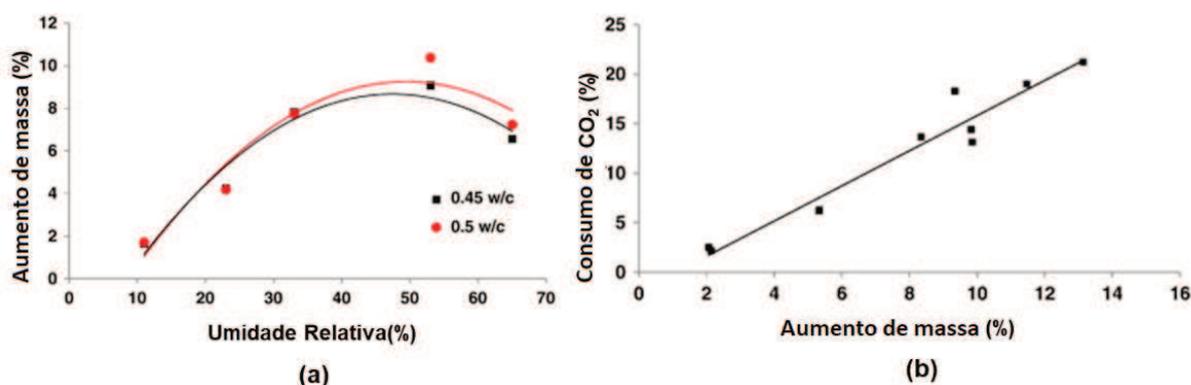
Levando em consideração que a carbonatação ocorre por meio da solução do CO_2 e do Ca(OH)_2 em água, a umidade do concreto apresenta grande influência para a reação da carbonatação. Dessa forma, quando os poros do concreto estão completamente secos, não há dissolução dos elementos e a reação não inicia. Quando os poros, de forma contrária, estão completamente saturados, a reação da carbonatação também é prejudicada pelo fato que o oxigênio não consegue penetrar nos poros do concreto. A situação ideal, por fim, é quando os poros apresentam umidade parcial, permitindo que o Ca(OH)_2 e o CO_2 sejam dissolvidos e iniciem a reação. (PAULETTI, 2009).

Pauletti; Possan e Dal Molin (2007) apresentam uma relação dos teores de umidade empregados em diversos estudos nacionais de carbonatação, sendo que praticamente todos estavam entre 50 e 80% e o teor mais utilizado foi o de 70%. Com relação a estudos internacionais, Ashraf (2016) apresenta que os teores mais empregados na literatura

internacional estão entre 50% e 70%, sendo que a maioria emprega a umidade relativa de $65 \pm 5\%$.

Galan, Andrade e Castellote (2013) realizaram carbonatação de pastas de cimento a 0,5% de CO₂ por um ano em diferentes teores de umidade relativa. Com isso, encontraram um teor ideal de umidade relativa para carbonatação de aproximadamente 50% (Figura 11 (a)). Eles ainda verificaram que ocorre um aumento de massa das amostras que é diretamente relacionado ao consumo de CO₂, conforme pode ser visto na Figura 11 (b).

Figura 11 – Aumento de massa e consumo de CO₂ para diferentes teores de umidade relativa



Fonte: Adaptado de Galan, Andrade e Castellote (2013, p. 24)

A umidade relativa ideal, portanto, está relacionada ao teor de CO₂ empregado para a carbonatação. Isso porque, quando ocorre a carbonatação acelerada, há uma grande concentração de CO₂ para ser dissolvido na água presente nos poros do concreto e, quanto mais água houver, maior será a difusão de íons e mais rapidamente ocorrerá a reação com os íons Ca²⁺ e a precipitação do CaCO₃. Essa umidade, entretanto, não deverá alcançar a saturação, fato que impede a penetração do gás carbônico. (HOUST; WITTMANN, 2002; CIZER et al., 2012).

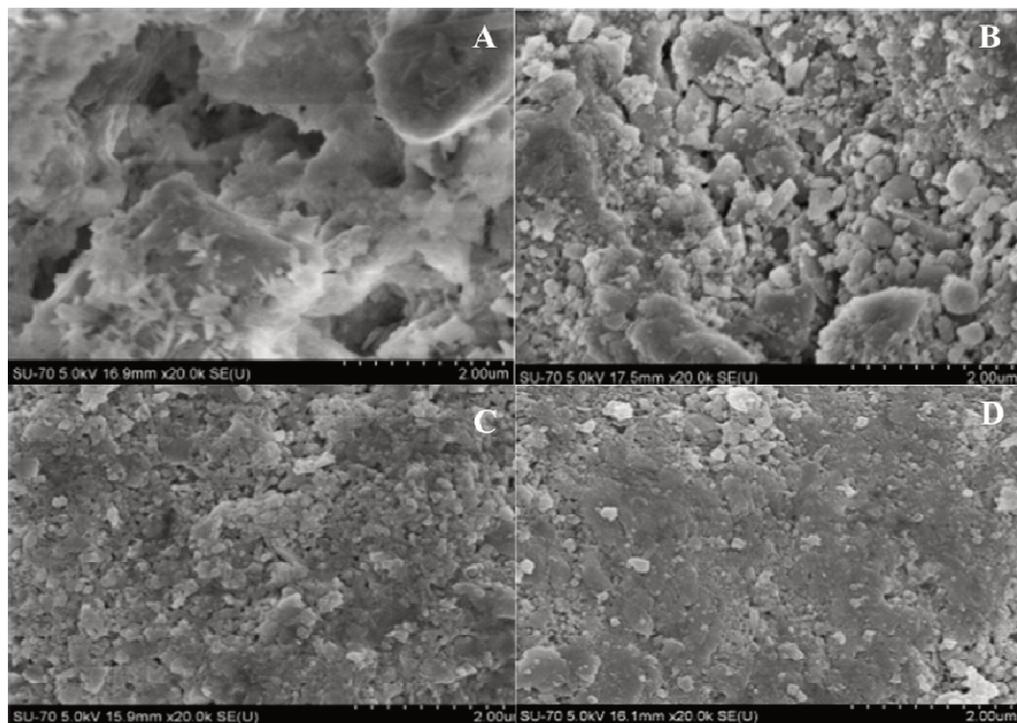
2.3.2.3. Concentração de CO₂

A concentração de CO₂ disponível no ambiente em que o concreto está inserido também possui grande influência sobre a profundidade que a carbonatação alcança. Há tendência de que, quanto maior o teor de CO₂, maior a taxa de carbonatação. Dessa forma, processos acelerados resultam em carbonatação do concreto muitas vezes mais rápida. Hentges et al., (2016) constataram que a profundidade de carbonatação de concretos atingida em um dia a 3% de CO₂ pode representar a profundidade alcançada em um ano de condições naturais. Quando o percentual passa para 100%, Galan, Andrade e Castellote (2013) afirmam

que a carbonatação pode alcançar em uma hora o que levaria aproximadamente 36 dias de exposição natural em ambiente externo e 54 dias em ambiente protegido.

Cui et al. (2015) submeteram concretos à carbonatação acelerada sob concentrações de 2%, 10%, 20%, 50% e 100%, de CO₂. Os autores mostram que há um grande aumento na profundidade de carbonatação dos concretos quando o teor de CO₂ aumenta de 2% para 20%, porém, para 50% e 100%, a taxa de carbonatação diminui drasticamente, apresentando quase que estabilização. Em imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) pelos autores (Figura 12) é verificada uma mudança na estrutura dos poros do concreto a partir da alteração da concentração de CO₂.

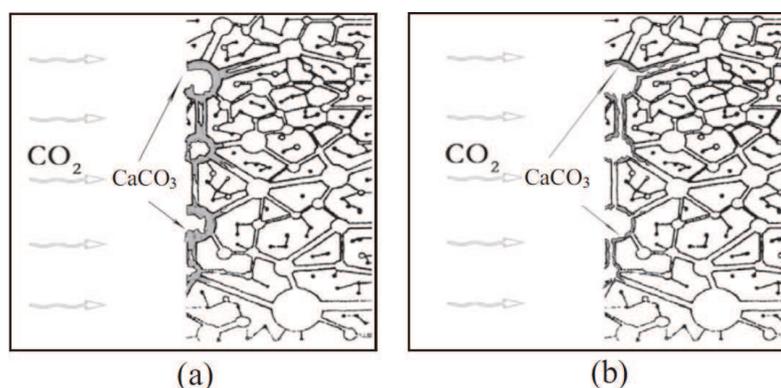
Figura 12 – Estrutura microscópica de concreto não carbonatado (a) e submetido à carbonatação por 7 dias a 10% (b), 20% (c) e 50% de CO₂ (d).



Fonte: Adaptado de Cui et al. (2015, p. 525)

Segundo os pesquisadores, o aumento no teor de CO₂ gera alteração no produto de carbonatação formado, sendo que altas concentrações de gás carbônico formaram estruturas mais densas, com poros muito pequenos e pouco interligados o que acaba impedindo a continuação da carbonatação. De forma contrária, concentrações de até 20% formaram produtos de carbonatação mais porosos, permitindo a continuação da difusão de CO₂ nos poros do concreto. Para ilustrar esse efeito, os autores apresentam a Figura 13.

Figura 13 – Mecanismo de difusão da carbonatação no concreto sob (a) alta e (b) baixa concentração de CO_2



Fonte: Cui et al. (2015, p. 526)

2.3.2.4. Composição do concreto

Como é bem sabido, concretos de maior qualidade apresentam maior resistência a agentes agressivos e, entre eles, a carbonatação. Thiery et al. (2007) afirmam que a frente de carbonatação é mais rápida quando o concreto apresenta maior porosidade, e que esta tem velocidade ainda maior quando essa condição está combinada à uma alta concentração de CO_2 no ambiente.

A utilização de pozolanas em concretos gera dúvidas quanto à influência na velocidade de carbonatação, pois em concretos mais porosos a pozolana tende a causar o refinamento da estrutura de poros, acarretando em carbonatação mais rápida devido à menor área interna a ser carbonatada. Outro motivo é que o alto teor de sílica reage com os produtos de hidratação do cimento, deixando menor quantidade destes para a carbonatação, fazendo com que a reação avance mais rapidamente em busca dos álcalis. (MEHTA; MONTEIRO, 2015). Pode-se levar em consideração, ainda, que ao ter o cimento substituído por materiais como sílica, escória e cinzas, há um aumento na porosidade das idades iniciais dos concretos, o que pode levar à maior carbonatação. (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991).

Por outro lado, concretos de baixa relação a/c acabam por não apresentar diferenças significativas quanto à presença de pozolanas, pois a matriz cimentícia apresenta maior densidade e a interligação entre os poros é pequena, dificultando o acesso do CO_2 a maiores profundidades (KULAKOWSKI, 2002). Souto-Martinez et al. (2017), por outro lado, estimam que o sequestro de CO_2 por parte de concretos de maior resistência (45 MPa, por exemplo), passa a superar os de menor resistência (15 e 30 MPa) em idades mais avançadas. Os pesquisadores indicam, através de modelos matemáticos, que isso passa a ocorrer a partir dos 75 anos.

Em geral, trabalhos que empregaram MCS apresentam uma redução na resistência à carbonatação, o mesmo acontece para concretos produzidos com cimento álcali-ativado e cimento sulfoaluminato de cálcio belítico. (ASHRAF, 2016).

2.3.2.5. Cura

Segundo Cascudo e Carasek (2011), boas condições de cura também têm grande importância na proteção do concreto à carbonatação, em função de que esta ocorre com a difusão de CO_2 de fora para dentro da estrutura, pois CO_2 vem do ambiente externo em busca da reação com os produtos de hidratação do cimento, e quando esta reação já ocorreu na primeira camada de poros, ele vai em busca das próximas. Assim, uma cura adequada aumenta a hidratação da pasta de cimento na superfície do concreto, diminuindo a porosidade do mesmo.

Claisse, El-Sayad e Shaaban (1999) mostram que uma amostra de concreto submetida à cura submersa pode vir a ter o dobro de resistência à carbonatação de uma amostra do mesmo concreto curada ao ar. Isso porque o grau de hidratação tem grande influência sobre os poros capilares do concreto e, quanto menor a qualidade da cura pela qual passou o concreto, maior a porosidade suscetível à carbonatação. Na pesquisa realizada, os autores verificaram que a porosidade de amostras de concreto com a/c 0,60 curadas ao ar é 43% maior do que quando curadas em água. Para a relação a/c 0,45, essa diferença é de 17%.

2.3.3. Características de concretos carbonatados

Conforme discutido, a carbonatação tem a tendência de preencher os poros do concreto com o CaCO_3 formado e isso pode vir a reduzir a porosidade, diminuindo a absorção de água dos concretos carbonatados.

Para verificar essa questão, Claisse, El-Sayad e Shaaban (1999) estudaram os efeitos da carbonatação sobre a porosidade e a permeabilidade ao ar de concretos com relação a/c de 0,45 e 0,60 e curados em água e em ar. Foi realizada carbonatação de até 140 dias sob 5% de CO_2 . Os pesquisadores demonstram que a carbonatação pode aumentar em até 37% a impermeabilidade, no ensaio de permeabilidade ao vácuo, e reduzir até 38% da porosidade dos concretos estudados quando realizado o ensaio de picnometria com hélio. Os autores mostram, ainda, que concretos com maior relação a/c – e menor f_{ck} – apresentam maior propensão à carbonatação e, por isso, também são mais beneficiados nos ensaios estudados.

Dias (2000) confirma isso, estudando o aumento de massa, diminuição da porosidade e redução da sortividade de concretos ao longo do tempo, atribuindo esse efeito à carbonatação. Dias explica que estruturas de concreto de menor f_{ck} apresentam bom desempenho quando expostas por serem mais suscetíveis à carbonatação que acarreta na melhoria da superfície.

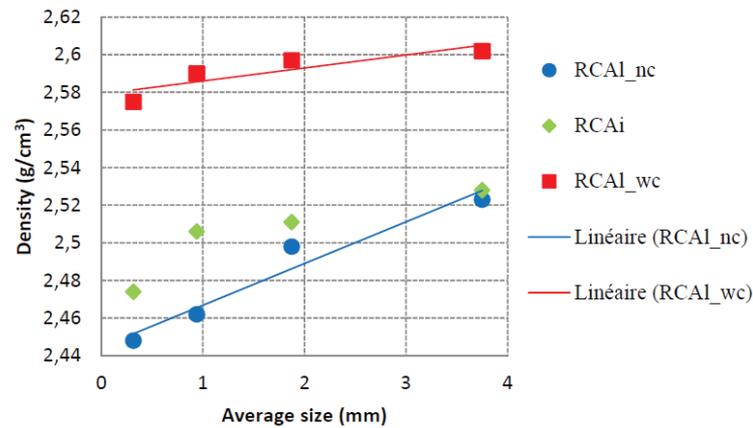
2.3.4. Carbonatação do ARC

Claisse, El-Sayad e Shaaban (1999) buscaram mostrar que a carbonatação tem grande influência sobre a absorção de estruturas de concreto antigas. Para isso, moldaram concretos com relações a/c de 0,45 e 0,60, e submeteram os corpos de prova a duas formas de cura por 28 dias: ao ar e submersa. Então, realizaram a carbonatação acelerada em câmara com 5% de CO₂ por 140 dias, retirando amostras ao longo do tempo para leituras e ensaios de permeabilidade a vácuo e volume de poros por picnometria de gás hélio. Nas amostras de maior relação a/c curadas ao ar, a redução de permeabilidade devida à carbonatação foi de 37%, já nas amostras com a/c 0,45 curadas de forma saturada esse valor foi de apenas 2%. Em todos os casos, quanto maior o tempo de carbonatação, maior a redução na permeabilidade. A redução de poros também aumentou ao longo do tempo de carbonatação: 38% para a/c 0,60 curada ao ar e 18% para a a/c 0,45 curada em água.

Após a carbonatação de agregados miúdos, Zhang et al. (2015) executaram argamassas e verificaram que a fluidez apresentou um ligeiro aumento (8,2% em média). A resistência à compressão das argamassas contendo agregados reciclados carbonatados também foi de aproximadamente 8% e o ensaio de migração de íons cloreto foi o que apresentou os resultados mais significativos, pois as argamassas moldadas com ARC carbonatado apresentaram, em média, 8,5 vezes menor difusão de cloretos quando comparadas às argamassas com ARC não carbonatado.

Zhao et al. (2016) carbonataram de forma acelerada agregados miúdos reciclados de concreto (AMRC) e confirmaram essa questão, mostrando a evolução da massa específica com relação à granulometria. Na Figura 14, são apresentados os resultados encontrados de agregados reciclados de concretos produzidos em laboratório (RCAI) e provindos de indústria (RCAi). Parte daqueles produzidos em laboratório foi mantida em células de carbonatação de CO₂ puro (RCAI_wc) e outra parte protegida para que não carbonatasse (RCAI_nc). No gráfico da Figura 14, percebe-se que, com o aumento da dimensão média do grão, o agregado miúdo reciclado apresenta um aumento também em sua massa específica e a carbonatação resultou em aumento da densidade de todas as partículas.

Figura 14 – Densidade em função do tamanho médio da partícula

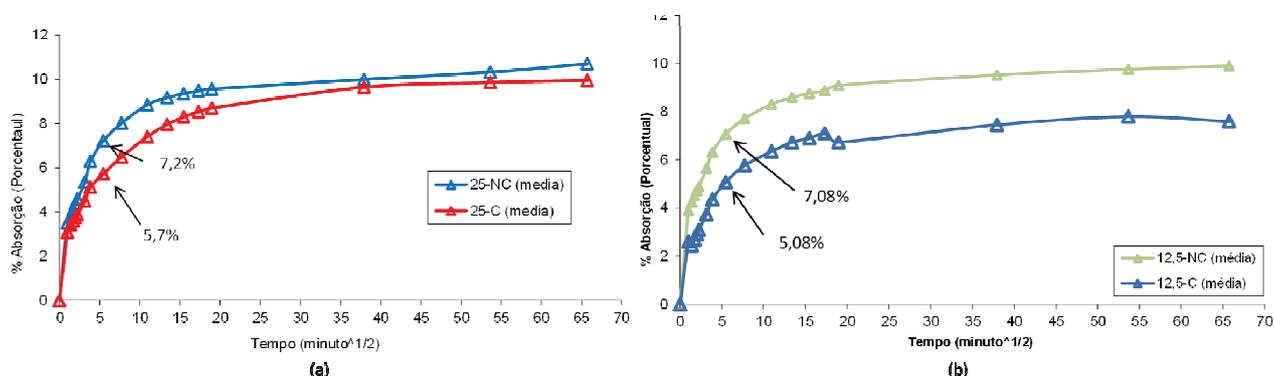


Fonte: Zhao et al. (2016, p. 8)

O aumento médio da densidade, verificada a Figura 14, é de 4,4%, valor similar aos apresentados por Zhang et al. (2015) de 4,7% e 5,6%. A absorção de água e a porosidade também foram medidas no trabalho de Zhao et al. (2016) e os resultados obtidos foram de redução de até 32,7% e de 6,3%, respectivamente, sendo que o ensaio de porosidade foi executado por intrusão de mercúrio. Para Zhang et al. (2015), a redução na absorção de água foi de 25,5% em média.

Para agregados graúdos reciclados de concreto, Fröhlich, Hentges e Kulakowski (2014) também verificaram redução na absorção de água de 20% para a dimensão de 25 mm e de 28% para os agregados de 12,5 mm (Figura 15). A carbonatação foi realizada por 7 dias a uma concentração de 10% de CO₂ e, quando realizados concretos com os agregados carbonatados e não carbonatados, não foram percebidas alterações nas medidas de abatimento. Por outro lado, a resistência a compressão dos concretos com agregados não carbonatados foi 10% maior quando comparada aos concretos com agregados reciclados carbonatados. Segundo as autoras, isso se deve à maior absorção de água dos agregados não carbonatados que pode ter gerado maiores alterações na relação a/c dos concretos.

Figura 15 – Curva de absorção de AGRC (a) 25 mm e (b) 12,5 mm não carbonatado e carbonatado

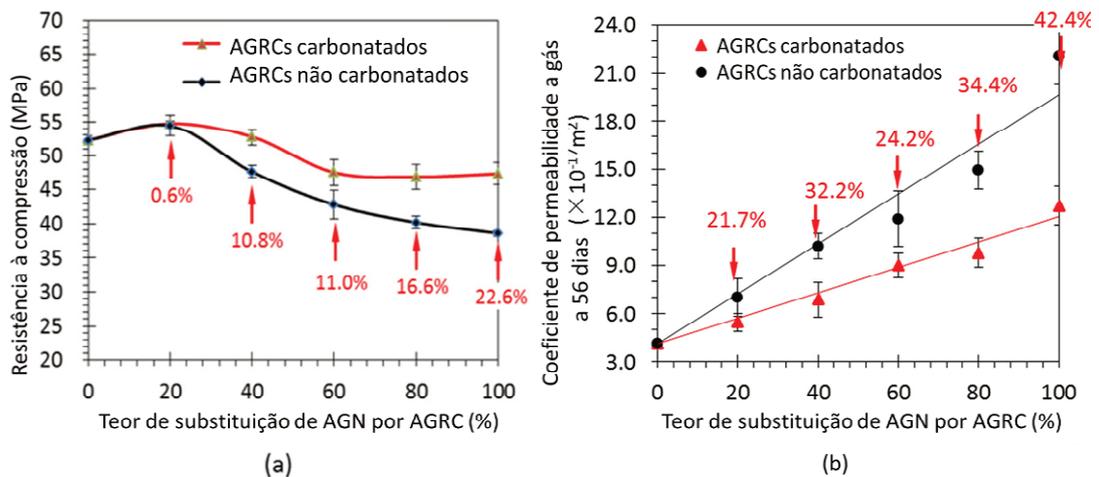


Fonte: Adaptado de Fröhlich, Hentges e Kulakowski (2014)

O aumento de densidade de agregados reciclados carbonatados também foi visto na fração graúda por Xuan, Zhan e Poon (2016). Os autores comentam que as partículas menores apresentam maior carbonatação, e com isso maior acréscimo de densidade, pelo fato de possuírem maior teor de argamassa em sua composição. Tamanhos menores de agregados também apresentam maior área superficial específica, o que contribui para a maior carbonatação. Da mesma forma, a absorção de água dos agregados também foi diminuída de 6,65% para 5,62%, em média, com a carbonatação.

A pesquisa de Xuan, Zhan e Poon foi apresentada em dois trabalhos, sendo que um foi publicado em 2016 e outro em 2017. Nesta, os pesquisadores executaram concretos contendo 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de agregados reciclados. Os agregados foram carbonatados em câmara com 100% de concentração de CO₂ e sob pressão de 5 Bar. Como pode ser visto na Figura 16, a carbonatação do AGRC melhorou as propriedades do concreto final para todos os casos e, quanto maior a presença do AGRC na mistura, mais visível se tornam os resultados.

Figura 16 – Resistência à compressão e permeabilidade a gás de concretos com agregados carbonatados e não carbonatados



Fonte: Traduzido de Xuan, Zhan e Poon (2016, p. 72 e 2017, p. 218)

A resistência à compressão alcançou um aumento de 22,6% do concreto com AGRC não carbonatado para o concreto com AGRC carbonatado. A permeabilidade a gás, a penetração de cloretos e a condutividade elétrica foram reduzidas em 42,4%, 36,4% e 15,1%, respectivamente. Através de porosimetria por intrusão de mercúrio, Xuan, Zhan e Poon (2017) verificaram que, além da porosidade total ter sido reduzida nos AGRCs através da carbonatação, os poros maiores que 200 nm desapareceram e os poros entre 50 nm e 200 nm foram reduzidos. Com isso, os autores constataram que os poros maiores foram preenchidos por produtos da carbonatação que tornou a microestrutura do agregado mais densa, resultando em aumento da durabilidade e resistência mecânica.

2.4. Microfinos de cerâmica vermelha

A indústria da cerâmica vermelha também se caracteriza como um setor da construção civil com grande geração de resíduos. GARCIA et al., (2014) afirmam que as perdas em produtos acabados são estimadas em 3 a 5%, o que corresponde a pelo menos 23 mil toneladas de resíduo cerâmico a cada mês. (ANICER, 2008). Já Hansen, Brehm e Kulakowski (2016) verificaram que as perdas são de 5,8% a 8,4% para processos produtivos artesanais e que esses valores são reduzidos para 1,6% a 2,7% quando o sistema de produção da cerâmica é automatizado.

Por ser um resíduo, os resultados obtidos a partir de seu emprego são diferentes ao longo da bibliografia. Essa variabilidade é causada, principalmente, pela composição da argila que serviu de matéria-prima e pelo processo de queima e sinterização dos blocos. Durante o

processo de queima, destacam-se como interferentes no produto final: os patamares de evolução de temperatura; o tempo de queima; a temperatura máxima atingida; a velocidade de resfriamento; e a uniformidade de temperatura do forno. (KAZMIERCZAK, 2010)

O Sindicer/RS, em pesquisa publicada no ano de 2008, aponta que pelo menos metade das empresas estudadas no Estado do Rio Grande do Sul realiza temperatura de sinterização na faixa de 700° C a 800° C. Além disso, a entidade indica que 85,2% dessas empresas não realiza qualquer tipo de controle em relação aos produtos fabricados.

A cerâmica vermelha é composta por 70 a 80% de Sílica e Alumina e, com isso, passou a ser estudada como um material cimentício suplementar, quando finamente moído. Assim, pesquisas verificaram o potencial pozolânico mínimo desse material, enquadrando-o na classe N da NBR 12653 (ABNT, 2014) como uma argila calcinada. (SEBASTIANY, 2014). Vale lembrar que a composição química da cerâmica vermelha está relacionada, além do processo de queima, à argila de origem e que, em casos de argilas com elevados teores de quartzo e feldspato, é provável que seus microfinos não apresentem potencial pozolânico. (MEHTA; MONTEIRO, 2015).

2.4.1. Atividade pozolânica da cerâmica vermelha

Souza e Dal Molin (2002), investigaram o comportamento pozolânico de uma argila caulínica do Estado do Pará utilizada por uma empresa na fabricação de cimento. Após moagem, obtiveram partículas com dimensão média de 4,65 μm e área superficial específica de 18.770 m^2/kg . Na Fluorescência de Raios-X (FRX), a quantificação de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ totalizou 87,3% da amostra e no ensaio de Difração de Raios-X (DRX) foi identificado um halo de amorfismo pequeno juntamente com picos cristalinos de caulinita. Segundo os autores, tais picos podem ter sido ocasionados por falta de homogeneidade no processo de calcinação da argila. Quando realizado o ensaio de resistência mecânica, a argila calcinada não alcançou a resistência mínima especificada pela NBR 5752 do ano de 1992.

Utilizando fragmentos de resíduos de blocos cerâmicos queimados a 1000° C, Fastofski et al. (2014) propuseram uma metodologia para avaliação dos microfinos de cerâmica vermelha (MCV) como material pozolânico e realizaram uma série de ensaios para caracterização do material. Apesar da presença majoritária de Silício detectada por FRX, os autores verificaram que a amostra foi considerada sem atividade pozolânica no ensaio de condutividade elétrica. Dessa forma, concluíram que é necessário a realização de uma caracterização mais ampla que identifique aspectos como o amorfismo da amostra, que pode

ser determinado através de DRX, o que confirma com o que foi verificado por Souza e Dal Molin (2002).

Sebastiany (2014) e Hansen (2016) estudaram finos de cerâmica vermelha, com dimensões médias de 24,53 μm e 15,32 μm , respectivamente, onde o primeiro produziu sua própria cerâmica a partir de queima a 700° C, 900° C e 1000° C, e Hansen (2016) empregou resíduos da indústria, queimado entre 700° C e 900° C. Em ensaio de FRX, as cerâmicas produzidas apresentaram Sílica como elemento majoritário e Ferro, Alumínio e Potássio em menor quantidade, e o resíduo apresentou 94,19% de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$. Enquanto que na cerâmica produzida por Sebastiany (2014) foi possível identificar halo de amorfismo após DRX, no resíduo de Hansen (2016) esse não foi verificado. Em ensaio de resistência mecânica, as argamassas produzidas por Sebastiany (2014) apresentaram atividade pozolânica enquanto que as de Hansen (2016) não alcançaram os valores mínimos para isto.

Verifica-se que o FRX de Sebastiany (2014) e o de Fastofski et al. (2014) se apresentaram de forma similar. Dessa forma, é possível que a principal diferença para que o primeiro apresentasse atividade pozolânica enquanto que o segundo não, é a maior temperatura de queima da cerâmica. Além disso, assim como a cerâmica de Hansen (2016), o material de Fastofski et al. (2014) foi proveniente de resíduos de olarias e, como colocado pelo Sindicar/RS (2008), é provável que não tenha havido controle na queima dos produtos.

Ainda com relação à temperatura de queima dos produtos cerâmicos, Sebastiany (2014) percebeu a maior incidência de picos cristalinos relacionada ao aumento desta temperatura, o que também foi verificado por Cordeiro e Désir (2010). Como resultado, os autores demonstram que há menores índices de atividade pozolânica quando as amostras cerâmicas são geradas em maiores temperaturas.

Toledo Filho et al. (2007) verificaram que não houve interferência na resistência à compressão e no módulo de elasticidade de argamassas de cimento e areia quando o cimento foi substituído em um percentual de até 20% por MCV. Os autores identificaram, ainda, redução da sortividade com o aumento da substituição e um maior percentual de poros capilares, indicando que os MCV geraram refinamento dos poros da argamassa. Mas et al. (2016) também executaram argamassas e afirmam que teores de substituição do cimento por pó de revestimento cerâmico são ideais entre 15% e 35%. Assim como demonstrado em outros tipos de pozolana, os autores identificaram resultados melhores principalmente aos 90 dias, indicando que a reatividade desse material passa a ocorrer em longas idades de cura.

Esse efeito foi percebido em Sales e Alferes Filho (2014), onde os pesquisadores realizaram ensaios apenas até os 28 dias de amostras de concretos contendo 10%, 20% e 40%

de MCV em substituição ao cimento. Segundo eles, o teor de 20% foi o que apresentou melhores resultados e, para este, foram verificados: 11% de aumento na resistência à compressão aos 28 dias; aumento de 8% no módulo de elasticidade; absorção de água 6% maior. Esses resultados possivelmente seriam alterados caso os ensaios tivessem sido realizados em idades mais avançadas.

Resultados benéficos em menores idades foram encontrados quando os MCV foram utilizados para execução de cimento álcali-ativado. A partir de ativação com hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), foi possível alcançar uma resistência de 30 MPa em sete dias de cura. (REIG et al., 2013).

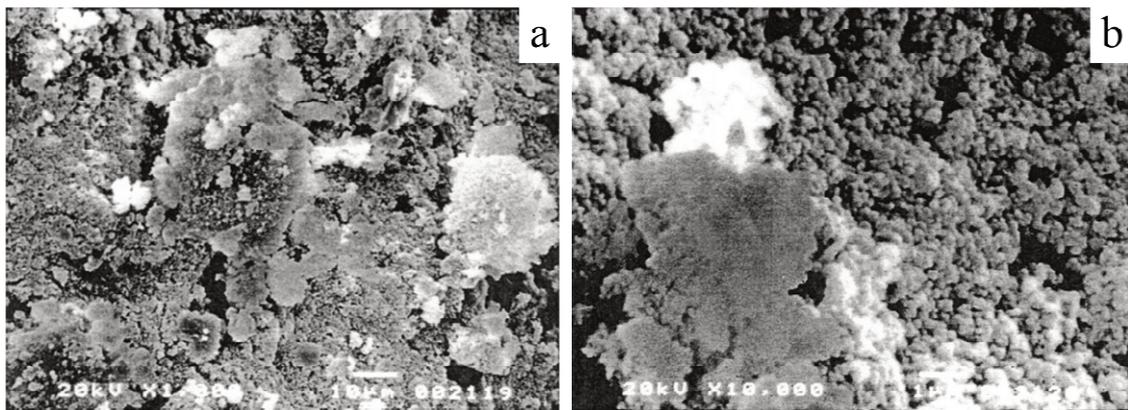
Em ensaios de durabilidade como difusão de cloretos, teste de envelhecimento (elevação e diminuição brusca de temperatura e umidade) e absorção de água por capilaridade, a substituição de 20% de cimento por resíduos de tijolos mostrou-se benéfica para concretos. Apesar de não retornarem maior resistência à compressão, os traços com MCV apresentaram menor perda de resistência mecânica no teste de envelhecimento e menor permeabilidade. A absorção de água por capilaridade, por outro lado apresentou resultados maiores nas amostras com MCV. (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010). Esse comportamento foi verificado também em outros trabalhos onde os autores indicam que a maior taxa de absorção, bem como de carbonatação, pode ser devida ao refinamento dos poros, acelerando o avanço da água e do gás carbônico nos ensaios de absorção capilar e carbonatação acelerada, respectivamente. (FEDUMENTI, 2013; SARTORI et al., 2017).

2.4.2. Imersão do ARC em solução de pozolanas

Shayan e Xu (2003), com o intuito de melhorar a superfície porosa de agregados reciclados e também a ZT existente, imergiram AGRCs em solução de silicato de sódio (1), silicato de sódio diluído (50%) (2), silicato de sódio diluído + cal (3), silicato de sódio diluído + sílica ativa (4), e silicato de sódio diluído + cal + sílica ativa (5). Para todos os casos, o AGRC foi primeiramente inserido na solução de silicato de sódio como forma de assegurar a fixação da sílica ativa e da cal à superfície do agregado. Em geral, o tratamento apenas com silicato de sódio não apresentou melhorias no desempenho dos concretos executados. O tratamento com sílica ativa, por outro lado, acarretou em aumento da resistência mecânica quando comparado aos concretos com AGRC não tratado. Em questões de durabilidade, todos os tratamentos se mostraram satisfatórios mesmo que não tenham apresentado influência significativa nos resultados.

A sílica ativa também foi empregada como tratamento de AGRCs por Katz (2004). Nesse estudo, o AGRC seco foi mantido por 24 horas em solução de um quilo de sílica para dez litros de água e, após, seco novamente. A superfície de AGRC obtida em cada tratamento pode ser vista na Figura 17 que apresenta imagens feitas em microscópio eletrônico de varredura da superfície inicial do AGRC, sem tratamentos (a) e da superfície do agregado após tratamento com solução de sílica ativa, onde percebe-se a formação de uma camada de sílica ativa (b).

Figura 17 – Superfície do AGRC (a) sem tratamento e (b) tratado com sílica ativa



Fonte: Adaptado de Katz (2004, p. 599 e 600)

Segundo Katz (2004), a presença da sílica fortalece a zona de transição entre o agregado reciclado e a nova matriz cimentícia e também as fissuras internas do agregado geradas durante o processo de cominuição. Os concretos executados com os agregados tratados apresentaram até 33% mais resistência à compressão aos 7 dias e 16% aos 28 dias quando comparados aos concretos com agregados reciclados de referência. Os autores concluem que em menores idades a argamassa do concreto apresenta menor resistência e, com isso, o tratamento dos agregados têm maior influência sobre a resistência. Em idades mais avançadas, por outro lado, a argamassa já apresenta melhor grau de hidratação e, por consequência, o tratamento dos agregados não atua de forma tão potencializada.

Pozolanas também foram empregadas por Shi et al. (2018) para o tratamento de agregados reciclados miúdos (ARM). Antes de serem executadas as argamassas, o ARM foi imergido em três suspensões de pozolanas: de sílica ativa, de cinza volante e de nanosílica (nano-SiO₂). As proporções água : sólidos foram de 10:1 para a sílica ativa e cinza volante e 20:1 para a nanosílica. Ao inserir o agregado na solução, este foi misturado por 30 minutos e mantido por mais 60 minutos. Após, os agregados foram secos por duas horas em estufa a 100° C para, então, serem executadas as argamassas. O tratamento do ARM acarretou em

redução na fluidez das argamassas, principalmente no tratamento com sílica ativa, segundo os autores devido à elevada área superficial das pozolanas. A sílica ativa, no entanto, foi a que gerou maior aumento na resistência à compressão, de forma que superou a argamassa de referência em 55,2%. Em relação à durabilidade, as argamassas com ARM tratado com sílica ativa também foram as que apresentaram melhor desempenho tanto para a carbonatação quanto para a penetração de cloretos.

Não foram encontrados estudos que empregaram microfinos de cerâmica para tratamento de agregados reciclados.

2.5. Resistividade elétrica do concreto no estado fresco

O método da resistividade elétrica de concretos pode ser considerado relativamente novo quando comparado com os demais ensaios propostos para monitoramento do concreto no estado fresco, sendo que uma pesquisa desenvolvida efetivamente em concretos foi publicada inicialmente no ano de 2010 por Mancio et al. (2010). Este procedimento ainda não possui normatização, porém vem demonstrando resultados positivos muito precisos para a determinação da relação água/aglomerante e também na projeção de resistências à compressão aos 28 dias (f_{cj}) dos concretos estudados.

Em escala laboratorial, o equipamento utilizado nas pesquisas que utilizaram este ensaio consiste de uma sonda, desenvolvida pelos próprios autores e construída com base na Lei de Archie e no método dos quatro pontos.

A lei de Archie, ainda que seja mais amplamente utilizada para determinar a resistividade de rochas e para uso na geofísica, pode ser aplicada a materiais porosos em geral. Isso porque ela tem como base a porosidade do material e a resistividade do fluido presente nos poros. Considerando poros parcialmente preenchidos, a lei de Archie é utilizada conforme apresentada na Equação 12. (MANCIO et al., 2010).

$$\rho_b = \frac{\rho_f}{a\phi^m} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

ρ_b – Resistividade elétrica global do material;

ρ_f – Resistividade elétrica da solução,

a e m – constantes empíricas;

ϕ – porosidade;

O método dos quatro pontos tem como base a possibilidade de determinação de mapas de regiões com diferentes resistividades através da aplicação de corrente elétrica contínua. Para isso, aplica-se corrente em dois pontos e mede-se a diferença de potencial através de outros dois pontos (MEHTA; MONTEIRO, 2015). No arranjo de Wenner, o espaçamento entre os pontos de leitura (A e B) e os de aplicação de corrente (M e N) é igual e, portanto, a equação geral para determinação da tensão é a apresentada na Equação 13.

$$V = \frac{I\rho}{4\pi a} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

V – diferença de potencial (tensão);

ρ – Resistividade elétrica;

I – Corrente elétrica;

a – Espaçamento entre eletrodos;

Levando-se em conta que a incógnita é a resistividade do material e que a tensão é medida durante o ensaio, a equação é ajustada e pode ser resumida conforme a Equação 14.

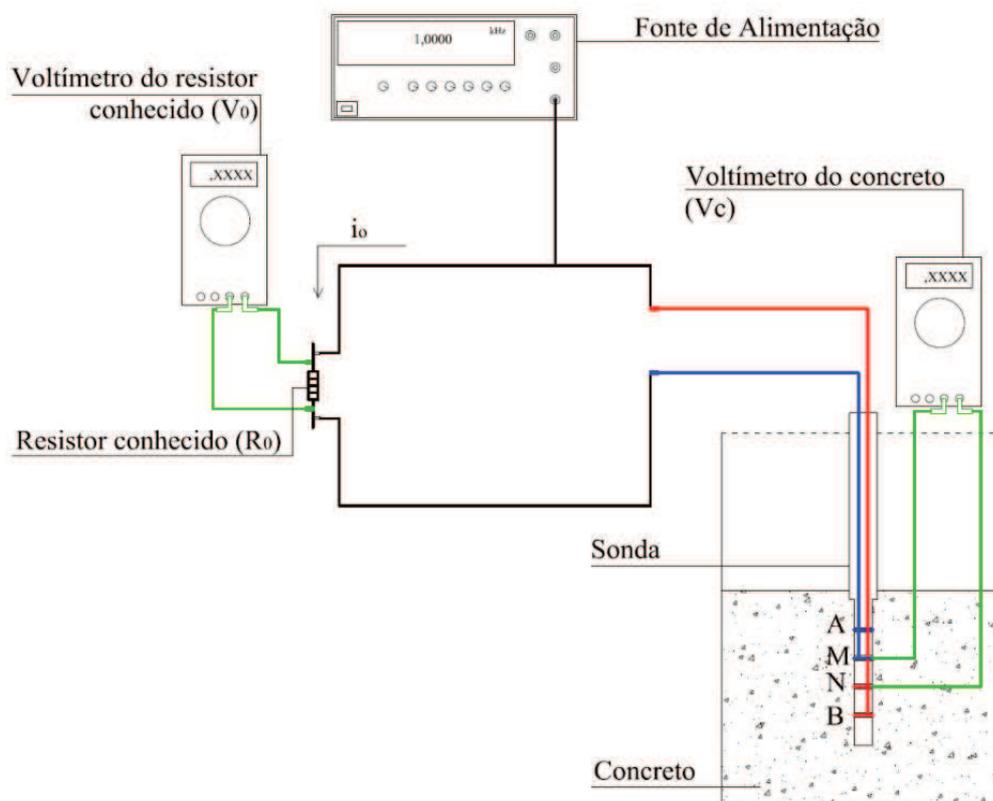
$$\rho = \frac{V}{I} 4\pi a \quad (\text{ajuste Equação 13})$$

$$\rho = R \times k \quad \text{Equação 14}$$

Neste caso, k passa a depender exclusivamente das dimensões com as quais a sonda será executada.

Para realização do ensaio é necessário conectar os eletrodos da sonda à uma fonte e um voltímetro, sendo que para o fechamento do circuito deverá haver, ainda, um resistor com resistência elétrica conhecida também conectado a um voltímetro (BRAUN, 2015). A Figura 18 apresenta um esquema de montagem do circuito.

Figura 18 – Esquema do circuito elétrico empregado no experimento



Fonte: Hentges (2015)

O concreto a ser ensaiado é colocado fresco em um recipiente cilíndrico com dimensões aproximadas de 30 x 40 cm e no centro desta mistura a sonda é inserida na posição vertical de forma que a amostra de concreto cubra todos os eletrodos. A partir daí são feitas leituras nos dois voltímetros do circuito durante período pré-definido. Neste período é recomendado que o concreto seja misturado para evitar possível exsudação da água da amostra, o que acarretaria em alteração nas leituras do ensaio.

Para a definição da relação água/aglomerante, é preciso que se faça uma calibração da sonda no intuito de determinar o fator geométrico. Isso é necessário porque cada sonda possui resistividade própria que varia com as dimensões nas quais ela foi construída.

Em seus ensaios, Braun (2015) e Hentges, Kulakowski e Mancio (2015) analisaram sempre duas amostras ao mesmo tempo, porém percebe-se que as amostras sempre apresentaram valores muito similares, por vezes até mesmo exatamente iguais, demonstrando que apenas uma amostra se faz suficiente para a obtenção de resultados confiáveis e que pode ser reduzido o consumo de concreto nesse ensaio.

Os resultados que foram obtidos por Mancio et al. (2010), Braun (2015) e Hentges (2015) mostram que o método apresenta grande precisão na obtenção de resultados. Porém,

para mesmas relações água/aglomerante podem ser encontradas diferentes resistividades quando ocorre variação dos materiais empregados na mistura. Ledur (2017) ao empregar o método em uma empresa de serviços de concretagem mostra isso quando compara com concretos que executou em laboratório. Apesar disso, a tendência de aumento de resistência do concreto quando há redução da resistividade é mantida.

Dessa forma, para que esse método venha a ser utilizado em obra de modo eficiente e prático, é necessário que se obtenham curvas de calibração para diversos tipos de mistura, onde sejam englobadas as variações citadas. Outra questão para a utilização em campo de um equipamento para o método de resistividade elétrica é que este deverá ter um dispositivo portátil acoplado à sonda, ou seja, este dispositivo deverá possuir bateria interna e display ou alguma outra forma de apresentação dos resultados. Esses pontos foram atendidos por Mancio et al. (2017), que patentearam um equipamento portátil para a estimativa da resistência à compressão que utiliza a resistividade elétrica para determinação e o método de Wenner para arranjo do dispositivo.

Os fatores relativos ao concreto que podem vir a influenciar nos dados de resistividade elétrica obtidos são a relação água/aglomerante, o tipo de cimento, a presença de adições e, principalmente, o teor de umidade:

- a) Relação água/aglomerante: a presença de água na mistura influencia devido à não condutividade de eletricidade da água pura. Dessa forma, quanto maior água houver no concreto, maior a resistência à passagem de corrente elétrica. Olhando-se pela Equação 12, tem-se que maior será o ρ_f quanto maior o volume de água. Em termos gerais, quanto maior a relação a/c da mistura, maior a resistividade do concreto (MANCIO et al.; 2010);
- b) Tipo de cimento: ao se misturar com a água, o cimento passa a dissolver-se e dispersar íons que tornam a solução mais condutiva de eletricidade (menor o ρ_f na Equação 12). Conseqüentemente, concretos que contenham cimentos de partículas menores, como como o CPV-ARI, apresentam menor resistividade elétrica. Por outro lado, cimentos que contêm maiores teores de adições minerais, como o CPIII e o CPIV, apresentam maiores resistividades características devido às partículas que não reagem nas primeiras horas (BRAUN; 2015);
- c) Presença de adições minerais: Da mesma forma que ocorre com os cimentos pozolânico e com escória, adições minerais tendem a aumentar a resistividade das misturas devido à presença de partículas não condutoras na solução da

mistura. Ou seja, os íons transmissores da eletricidade dissolvidos na água do concreto passam a ser barrados pelos grãos das adições (MANCIO et al.; 2010);

- d) Teor de umidade: juntamente da relação água/aglomerante, o teor de umidade é um fator que apresenta grande influência sobre os valores de resistividade elétrica dos concretos. Isso porque em baixos de teores de umidade do concreto, mesmo que com menores relações água/cimento, a presença de sólidos é aumentada e faz com que a corrente elétrica atravesse a mistura com maior dificuldade (HENTGES, 2015);

A reação de hidratação do cimento também pode vir a influenciar os resultados ao longo do tempo de ensaio, pois a água passa a não estar mais disponível para transmitir a corrente elétrica. (WEI; LI, 2006). Nessa situação, aditivos estabilizadores de hidratação passam a isolar esse efeito por mais tempo (KAUTZMANN et al.; 2017).

Entende-se, por fim, que a resistividade elétrica é um método que revela muito sobre a qualidade de misturas de concreto, apresentando grande potencial de emprego em obra para a estimativa prévia da resistência à compressão e da relação água/aglomerante, sendo um complemento importante para o método de abatimento de tronco de cone.

3. METODOLOGIA

O programa experimental dessa pesquisa foi composto por fatores de controle e variáveis, materiais e métodos.

3.1. Fatores e variáveis

Para o alcance dos objetivos propostos neste trabalho, foram impostas as seguintes variáveis de pesquisa: fatores de controle, variáveis fixas e variáveis de resposta

3.1.1. Fatores de controle com níveis variáveis

Os fatores de controle e os níveis de estudo deste trabalho estão apresentados na Tabela 6. Estes fatores, juntamente com o concreto de referência que será composto por 100% de AGN, totalizam 12 traços.

Tabela 6 – Fatores de controle com níveis variáveis de estudo

Fatores de controle	Preparo do AGRC			Relação a/c		
Níveis de estudo	Referência (AGRC-R)	Pozolana (AGRC-P)	Carbonatação (AGRC-C)	0,45	0,55	0,65

Fonte: Elaborado pela autora

3.1.2. Fatores de controle com nível fixo

Os fatores de controle que permaneceram fixos neste estudo são:

- Tipo de cimento: Cimento CP II F-40;
- Origem do ARC: controle tecnológico de empresa de serviços de concretagem;
- Resistência à compressão do agregado de origem: 20-25 MPa;
- Tipo de aditivo: aditivo estabilizador de hidratação;

3.1.3. Fatores não controlados

Os fatores que não poderão ser controlados na execução dos concretos são:

- Temperatura de moldagem e cura;
- Umidade relativa do ar durante a moldagem.

A umidade relativa do ar, apesar de não poder ter sido controlada para que se mantivesse constante, foi controlada para que tivesse um valor mínimo de 60%.

3.1.4. Variável de resposta

As variáveis de resposta para os ensaios realizados são:

- Absorção de água dos agregados reciclados;
- Abatimento dos concretos;
- Resistividade elétrica dos concretos no estado fresco;
- Resistência à compressão dos concretos aos 7, 28 dias;
- Absorção capilar de água dos concretos aos 28 dias;

3.2. Materiais

Os materiais utilizados para a execução dos concretos desta pesquisa consistiram em: cimento, aditivos, microfinos de cerâmica vermelha, agregado miúdo natural, agregado graúdo natural e agregado graúdo reciclado de concreto e água.

3.2.1. Cimento

Nessa pesquisa foi utilizado o cimento CP II-F-40 Itambé pelo fato de que este não possui adições que venham a apresentar influência nos resultados, principalmente no traço que empregou agregado reciclado tratado com pozolana. Esse cimento foi determinado, também, pelo fato de ter sido utilizado em trabalhos do grupo de pesquisa que, da mesma forma, utilizaram agregado reciclado de concreto.

Além disso, esse tipo de cimento é o de maior consumo na região sul do país. Dessa forma, em caso de emprego do método no mercado, é provável que os agregados reciclados e também os novos concretos sejam compostos por esse tipo de cimento.

Na Tabela 7 é apresentada a caracterização física, química e mecânica do cimento utilizado. Devido a questões logísticas, foi preciso empregar dois lotes diferentes, entretanto, verificou-se que não há diferenças significativas entre estes.

Tabela 7 – Fatores de controle com níveis variáveis de estudo

Parâmetro	Lote janeiro/2017	Lote julho/2017
Al ₂ O ₃ (%)	4,00	4,19
SiO ₂ (%)	18,12	18,16
Fe ₂ O ₃ (%)	2,75	2,95
CaO (%)	60,44	59,94
MgO (%)	3,72	3,56
SO ₃ (%)	3,05	3,30
Perda ao Fogo (%)	5,10	5,28
CaO Livre (%)	0,50	0,59
Resíduo Insolúvel (%)	0,78	0,96
Equivalente Alcalino (%)	0,71	0,74
Expansão à Quente (mm)	0,00	0,50
Início de Pega (h:min)	03:20	03:10
Fim de Pega (h:min)	04:00	04:00
Água Cons.Normal (%)	30,8	29,8
Blaine (cm ² /g)	4,510	4,430
#200 (%)	0,03	0,02
#325 (%)	0,20	0,40
fc 1 dia (MPa)	23,6	23,7
fc 3 dias (MPa)	40,2	37,7
fc 7 dias (MPa)	45,5	46,1
fc 28 dias (MPa)	54,4	53,5
Massa Específica (g/cm ³)	3,08	3,08

Fonte: Adaptado de Itambé (2017)

3.2.2. Aditivos

Nesta pesquisa, foram utilizados dois tipos de aditivos: estabilizador de hidratação e superplastificante

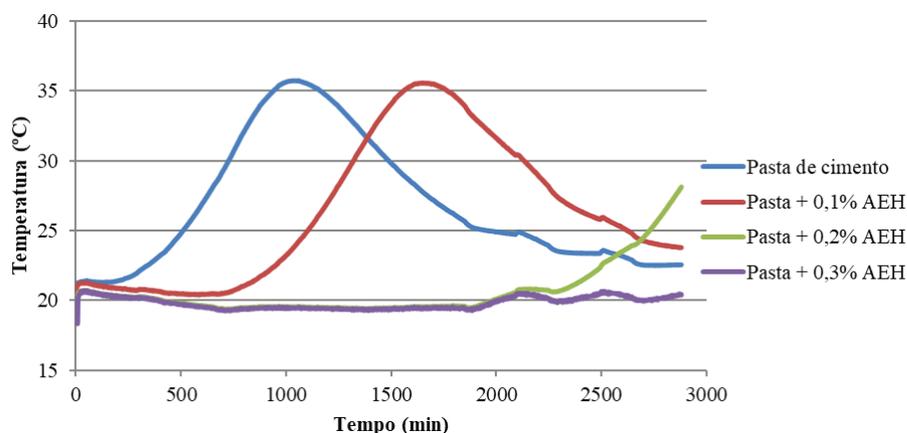
3.2.2.1. Aditivo estabilizador de hidratação

Nessa pesquisa foi utilizado o aditivo estabilizador de hidratação (AEH) com o objetivo de que as alterações obtidas nas propriedades do estado fresco dos concretos fossem geradas apenas pela absorção de água dos agregados, evitando que a hidratação do cimento acarrete na perda de abatimento.

O aditivo empregado nesta pesquisa é da linha Plasmix Control MIX 90 desenvolvido pela empresa Builder®. Possui pH que varia entre 6 e 8, densidade entre 1,05 e 1,15 g/ml (BUILDER, 2016).

O teor de aditivo a ser utilizado foi determinado por ensaio de evolução da temperatura de pastas de cimento ao longo do tempo, analisando-se pastas de relação a/c 0,5 e teores de aditivo AEH de 0,1%, 0,2% e 0,3%. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 19.

Figura 19 – Evolução da temperatura ao longo do tempo de pastas com AEH



Fonte: Elaborado pela autora

Dessa forma, o teor escolhido para ser utilizado no concreto foi de 0,2% em relação à massa de cimento. Esse valor foi adotado pelo fato de que, no concreto, o aditivo se distribui também na superfície dos agregados, tendo ação diminuída nas partículas de cimento e, com isso, o teor de 0,1% não seria suficiente para estabilizar a hidratação mínima de duas horas, tempo adotado para os ensaios de perda de abatimento ao longo do tempo e de resistividade elétrica do concreto no estado fresco.

3.2.2.2. Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante foi adotado para que houvesse padronização de alguns aspectos nos ensaios realizados no estado fresco do concreto. Para o ensaio de perda de abatimento ao longo do tempo, este aditivo foi empregado com o objetivo de que todos os concretos iniciassem com um abatimento de 120 ± 20 mm.

Para o ensaio de resistividade elétrica no estado fresco, se faz necessário a homogeneização da mistura algumas vezes ao longo dos 120 minutos, evitando uma possível exsudação. Para que isso seja possível, é preciso que o concreto tenha uma certa trabalhabilidade, permitindo que seja misturado.

Assim, foi utilizada uma pequena quantia de aditivo superplastificante, de forma a alcançar o abatimento inicial mínimo e também para que houvesse uma consistência mínima para mistura durante o ensaio de resistividade elétrica no estado fresco.

3.2.3. Microfinos de cerâmica vermelha

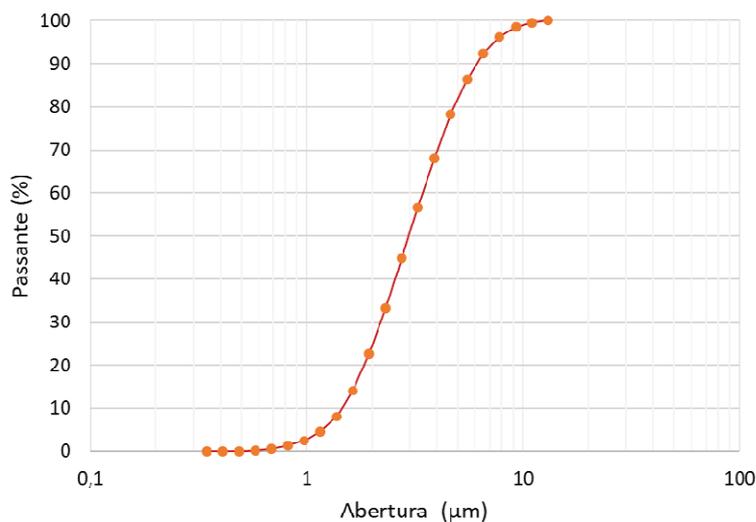
Para o tratamento pozolânico do AGRC foi utilizado resíduo de cerâmica vermelha (RCV). Este resíduo é proveniente de olaria na região do Vale do Taquari, sendo que os blocos cerâmicos foram queimados entre 700°C e 750°C.

Nessa pesquisa, buscou-se obter a menor granulometria possível e, para isso, o RCV passou por processo de moagem e peneiramento, aproveitando-se apenas o material de menor granulometria.

O processo de cominuição do resíduo desse material iniciou pela passagem em britador de mandíbulas e teve como segunda etapa a moagem no moinho de rolos em processo programado para 40 mil rotações. A partir disso, o RCV foi peneirado em peneira com malha de abertura 0,15 mm e o material passante foi levado para moagem no moinho de bolas excêntrico por uma hora. Após todo esse processo, foi utilizado apenas o material passante na peneira com abertura de malha de 325 μm .

A massa específica do material, determinada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Unisinos, é de 2,6355 g/cm^3 e a área específica é 40.463 m^2/g . A dimensão média da partícula, determinada por granulometria de difração laser, realizada no LCVM da Unisinos, com um analisador de partículas da Microtac S3500, é de 2,96 μm e a distribuição granulométrica é apresentada no gráfico da Figura 20. A preparação da amostra foi realizada mantendo-a submersa por 24 horas em solução de hexametáfosfato a 4,6% de forma a garantir a dispersão das partículas. Então, a amostra foi submetida a ultrassom externo a 100 W por 5 minutos e, após, a ultrassom interno a 40 W por 21 minutos. Por fim, foram inseridas no analisador por via úmida empregando-se água como fluido. (FERNANDES, 2018).

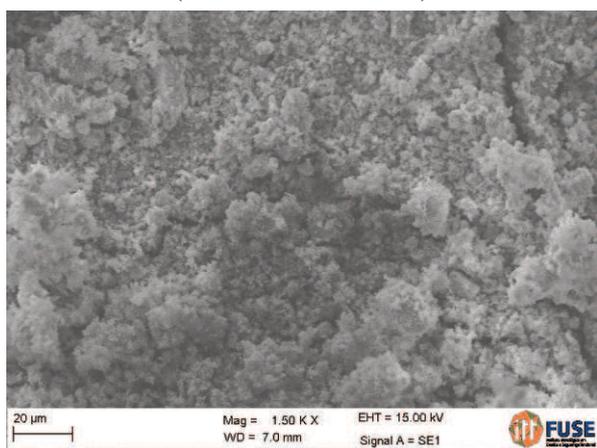
Figura 20 – Distribuição granulométrica dos MCV



Fonte: Elaborada pela autora

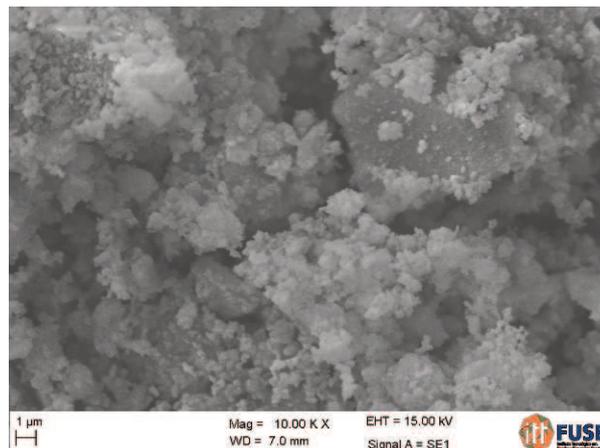
Na Figura 21 e na Figura 22 são apresentadas imagens dos MCV feitas em MEV com ampliação de 1500 vezes e 10.000 vezes, respectivamente. Percebem-se partículas várias dimensões, conforme indicou a granulometria a laser. Nota-se, também, que as partículas menores de 1 μm tendem a apresentar agrupamento, o que poderia vir a dificultar a dispersão em água e a penetração do material nos poros capilares dos agregados reciclados.

Figura 21 – Imagem em MEV dos MCV
(aumento de 1500x)



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 22 – Imagem em MEV dos MCV
(aumento de 10.000x)

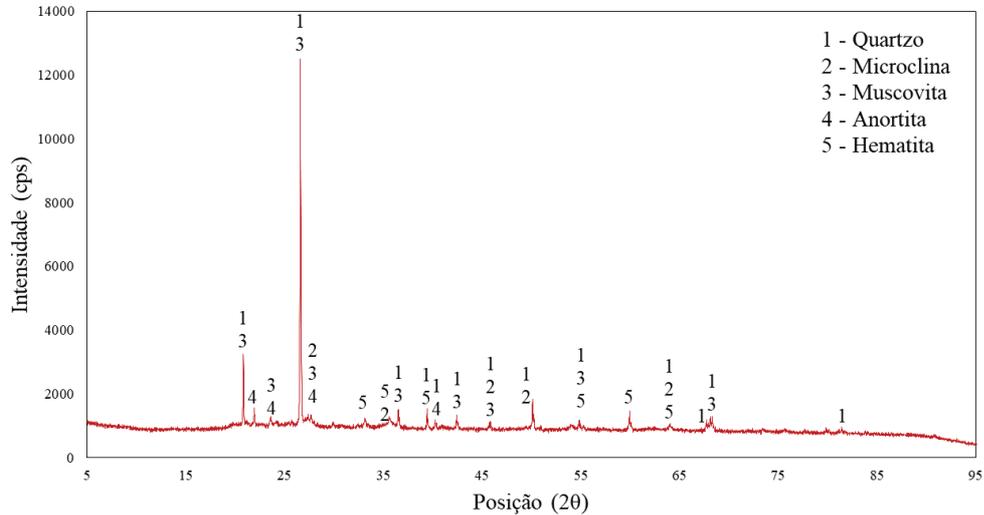


Fonte: Elaborada pela autora

O difratograma de raios X da amostra de MCV indicou picos de quartzo, microclima, muscovita, anortita e hematita, conforme apresentado na Figura 23. Pelo fato de apresentar um pico de grande intensidade em aproximadamente 27 graus, o halo de amorfismo não se faz

nítido no gráfico. Entretanto, ao ser ampliado o eixo vertical, é possível perceber um halo de amorfismo.

Figura 23 – Difratoograma de Raios X dos microfinos de cerâmica vermelha



Fonte: Elaborada pela autora

3.2.4. Agregado miúdo

Como agregado miúdo, foi utilizada areia de origem quartzosa proveniente do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul. Para a realização de sua caracterização, esse material foi previamente seco em estufa a 100° C e, após isso, armazenado em tonéis vedados. Toda a caracterização foi realizada no laboratório de materiais de construção (LMC) da Unisinos. Os dados obtidos de massa unitária, massa específica e composição granulométrica estão apresentados na Tabela 8, na Tabela 9 e na

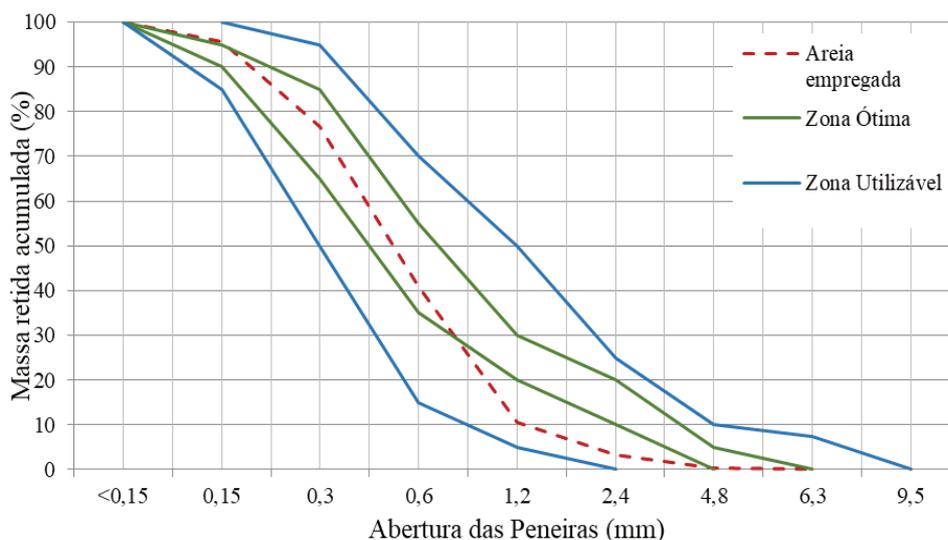
Figura 24.

Tabela 8 – Caracterização física do agregado miúdo

Característica (unidade)	Resultado
Massa unitária (g/cm ³) – NBR NM 45 / 2006	1,56
Aparente agregado seco (g/m ³) – NBR NM 52 / 2009	2,49
Saturado com superfície seca (g/cm ³)	2,53
Massa específica (g/cm ³)	2,58
Absorção (%)	1,00

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 24 – Granulometria do agregado miúdo natural



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 9 – Caracterização granulométrica do agregado miúdo utilizado na pesquisa

Abertura da Peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)
4,8	0	0
2,4	3	3
1,2	7	10
0,6	31	41
0,3	36	77
0,15	19	96
<0,15	4	100
Dimensão máxima característica (mm)		2,4
Módulo de finura		2,27

Fonte: Elaborado pela autora

3.2.5. Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural (AGN) utilizado nessa pesquisa é proveniente da cidade de Bento Gonçalves, sendo originado de rocha basáltica fragmentada e britada. No LMC da Unisinos foram determinadas a massa unitária e massa específica conforme NBR NM 53 (ABNT, 2009), apresentadas na Tabela 10 e sua composição granulométrica conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003), apresentada na Tabela 11 e na Figura 25.

Tabela 10 – Caracterização física do agregado graúdo natural

Característica (unidade)	Resultado
Massa unitária (g/cm ³)	1,56
Massa específica aparente (g/m ³)	2,49
Massa específica do agregado saturado com superfície seca (g/cm ³)	2,53
Massa específica (g/cm ³)	2,58
Absorção (%)	3,06

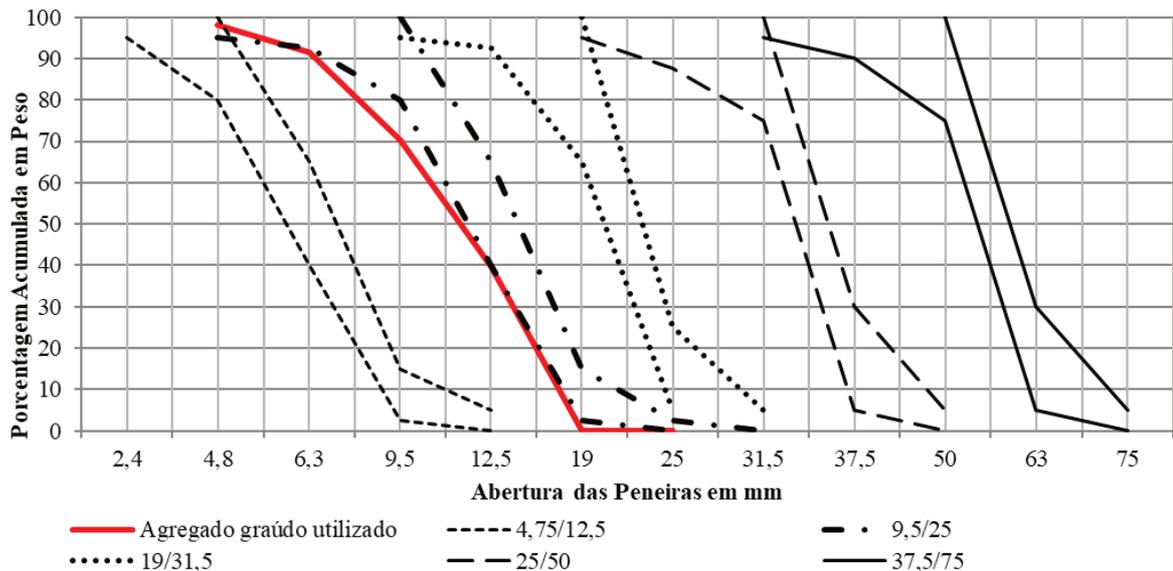
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 11 – Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural utilizado na pesquisa

Abertura da Peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)
19	0	0
12,5	40	40
9,5	30	70
6,3	21	91
4,75	9	100
<4,75	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		12,5
Módulo de finura		6,7

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 25 – Granulometria do agregado graúdo



Fonte: Elaborado pela autora

A partir do ensaio de granulometria, verificou-se que o teor de finos presentes na amostra foi de 0,05%, não sendo necessário que o material fosse lavado antes de sua utilização.

3.2.6. Agregado graúdo reciclado de concreto

Como substituição do AGN, nesta pesquisa foi utilizado resíduo de concreto de classe C25 proveniente de controle tecnológico de concreto aos 28 dias, de uma empresa de serviço de concretagem. Hamad e Dawi (2017) afirmam que este tipo de resíduo tem grandes vantagens ambientais e econômicas ao ser aproveitado como agregado reciclado de concreto pois: os custos de transporte e compressão dos corpos de prova são aproveitados; os custos de cominuição e peneiramento dos cilindros são comparáveis aos custos de britagem de rochas naturais em pedreiras; e as resistências e proporções de materiais dos traços são as mesmas.

Os corpos de prova foram curados de forma submersa em temperatura controlada de $21 \pm 2^\circ\text{C}$. Ao completarem 28 dias, os corpos de prova passaram pelo ensaio de compressão axial, onde apresentaram resistência média de 21,8 MPa com desvio padrão de 0,99 MPa. Após isso, os corpos de prova fissurados foram colocados em estufa a 60°C até constância de massa, processo que levou 10 dias. Então, os corpos de prova passaram por cominuição em britador de mandíbulas (Figura 26) com abertura de 20 mm e o material resultante foi armazenado em sacos plásticos separando-se em frações granulométricas de 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 4,8 mm e inferior a 4,8 mm.

Figura 26 – Cominuição dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pela autora

Para eliminar uma possível influência da diferença de granulometria entre o AGN e o AGRC, para a execução dos concretos foram utilizadas as mesmas frações em ambos os

agregados (natural e reciclado). Assim, a composição granulométrica do AGRC utilizado nesta pesquisa é a mesma do AGN, apresentada na Figura 25.

A massa específica do agregado reciclado sem tratamento foi determinada de duas formas: conforme a NBR NM 53:2009, no LMC da Unisinos, e pelo método de Picnometria com gás hélio, no LCVMat da Unisinos. Neste último, porém, devido às restrições do método, foi empregada apenas a fração granulométrica passante na peneira de 6,3 mm e retida na peneira de 4,8 mm. Já na determinação conforme norma foi empregada a granulometria utilizada nas moldagens. Essas características estão apresentadas na Tabela 12. Para os agregados reciclados beneficiados, a massa específica foi medida apenas por Picnometria com gás hélio, e os resultados são apresentados no item 4.1.2.

Tabela 12 – Caracterização física do agregado graúdo reciclado de concreto

Ensaio empregado	Característica (unidade)	Resultado
NBR NM 53:2009	Massa específica aparente (g/cm ³)	2,19
	Massa específica do agregado saturado com superfície seca (g/cm ³)	2,33
	Massa específica (g/cm ³)	2,57
	Absorção (%)	6,77
Picnometria de hélio	Massa específica (fração 4,8 mm) (g/cm ³)	2,48

Fonte: Elaborado pela autora

A absorção de água do AGRC foi determinada conforme o método explicado no item 3.4.1 elaborado por Leite (2001) e adaptado por Werle (2010) e tem os resultados apresentados junto aos resultados encontrados nesse trabalho.

A determinação do teor de argamassa do AGRC utilizado neste trabalho baseou-se nos métodos adotados por Padovan (2013) e Heineck (2012), onde as autoras empregaram o método de ataque térmico proposto por Ferreira (2007) e, após, o método de ataque químico indicado Sanchez (2004). Nesta pesquisa foi substituído o ácido clorídrico empregado pelas pesquisadoras pelo ácido nítrico 65% P.A./ACS da marca Neon. Este método está descrito passo a passo no APÊNDICE B.

O AGRC empregado neste trabalho apresentou um teor de argamassa de 44%, entando dentro do que é comumente encontrado na bibliografia (BEHERA et al., 2014). Na Tabela 13 são apresentados os teores de argamassa de cada fração granulométrica de agregado graúdo empregado para a execução dos concretos desta pesquisa, bem como a absorção média de água destas.

Tabela 13 – Teor de argamassa para cada fração granulométrica do AGRC

Fração granulométrica (mm)	12,5	9,5	6,3	4,8	Média
Teor de argamassa (%)	31	31	57	74	44
Absorção de água (%)	6,44	6,89	9,21	11,98	8,63

Fonte: Elaborada pela autora

A determinação da absorção de água das frações granulométricas do agregado reciclado foi realizada submergindo-se três amostras de 500 gramas de cada fração em água e mantendo-as por sete dias. Quando retirado da água, foi feita leitura da massa das amostras e determinada a absorção percentual de cada, adotando-se a média como valor de absorção final.

3.2.6.1. Tratamento por impregnação de MCV

Nesta pesquisa foi empregado tratamento pozolânico dos agregados reciclados com o objetivo de preenchimento dos poros e também visando a ocorrência de uma possível reação com os produtos de hidratação do cimento presentes nos poros da argamassa do AGRC. Ainda, objetiva-se que os MCV que ficarem aderido à superfície externa dos AGRCs possa vir a reagir com a pasta quando empregado e uma nova mistura de concreto e, com isso, fortalecer a zona de transição entre AGRC argamassa nova.

Este tratamento baseou-se no procedimento empregado por Katz (2004), fazendo-se algumas adaptações e utilizando-se os microfinos de cerâmica vermelha apresentado. A proporção em massa de água : AGRC : MCV adotada foi a mesma do autor, de 10:10:1, e o procedimento empregado é descrito no passo a passo a seguir. Foram disponibilizadas mais imagens deste processo no APÊNDICE A

Mistura dos MCV em água (Figura 27);

- 1) Adição do AGRC na solução de MCV, homogeneização da mistura e vedação do recipiente (Figura 28);
- 2) Durante sete dias, homogeneização da mistura uma vez ao dia. Esse processo foi feito pelo fato de que ocorre decantação dos MCV ao fundo do recipiente (Figura A1), gerando alteração da concentração e possível interferência na penetração nos poros do AGRC;
- 3) No sétimo dia, colocação dos agregados em estufa a 60°C para secagem por mais sete dias. Para isto, a mistura foi derramada em uma peneira de malha 2,4 mm de forma a reter os agregados e descartar a solução de MCV em excesso (Figura A2);

- 4) Após seco, o AGRC foi, mais uma vez, passado em peneira para remoção de pó de MCV em excesso e, então, armazenado em sacos plásticos vedados.

Esse procedimento foi empregado de forma separada para cada fração granulométrica dos AGRCs: 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,8 mm (Figura A3).

Figura 27 – Diluição dos MCV em água



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 28 – Inserção do AGRC na solução



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme discutido no item 2.4.1, pozolanas como os microfinos de cerâmica vermelha possuem a tendência de levarem prazos maiores para sua reação. Dessa forma, o processo de imersão do AGRC em pozolana, que em Katz (2004) era de apenas 24 horas, foi ampliado para 7 dias. Dessa forma, passaram-se pelo menos 28 dias entre a imersão do AGRC no banho de MCV e o rompimento aos 7 dias do concreto com AGRC-P. Assim, buscou-se garantir que a reação pozolânica tenha iniciado quando do rompimento dos corpos de prova e que o efeito do tratamento com MCV fosse percebido.

3.2.6.2. Carbonatação dos agregados reciclados

O segundo tratamento de realizado neste trabalho foi a carbonatação acelerada dos agregados reciclados. A concentração percentual de CO_2 determinada para isso foi de 10%, tendo como referência o trabalho de CUI et al. (2015), onde concretos de classe C30 apresentam 6 mm de carbonatação em 7 dias. Concentrações maiores que 10% não são desejadas pelo fato de que os produtos da carbonatação acabam preenchendo os poros superficiais e a porosidade interna continua elevada

Como forma de preparação das amostras para a carbonatação, foi realizado primeiramente o sazonalamento dos agregados reciclados. Nesse processo, também foi feita a separação das frações granulométricas. Isso porque cada uma apresenta teores de argamassa diferentes e, com isso, absorções de água características diferentes.

Assim, após a determinação da absorção de água de cada fração do agregado reciclado, os mesmos foram colocados secos em embalagens impermeáveis (Figura 29) e foi adicionada a água necessária para o alcance dos 70% de umidade. Esse percentual foi determinado com base na bibliografia apresentada no item 2.3.2.2 e também a partir do que foi empregado em pesquisas anteriores do grupo.

Figura 29 – Embalagens utilizadas no sazonalamento dos agregados reciclados

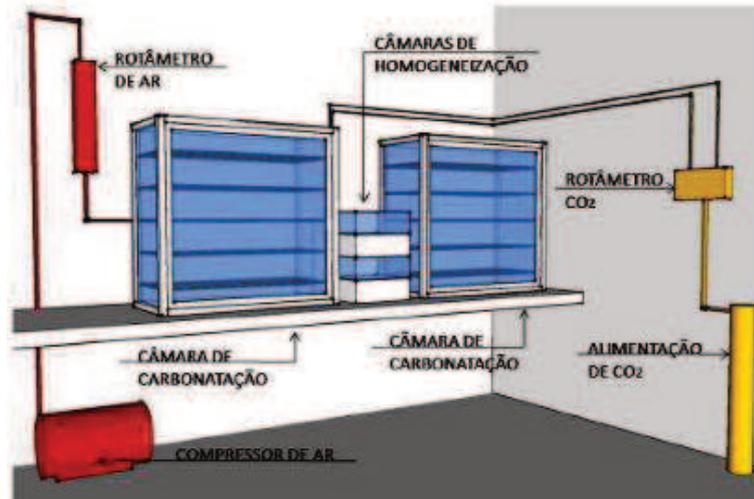


Fonte: Elaborado pela autora

Os sacos foram, em seguida, vedados e agitados levemente para que a água adicionada se espalhasse uniformemente por todos os agregados. Os sacos foram armazenados em sala com temperatura constante de $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 45 dias.

A carbonatação dos agregados reciclados foi realizada no LMC da Unisinos em câmaras que são abastecidas por cilindros de CO_2 e equipadas com compressores de ar que possibilitam a homogeneização do gás com o ar externo e, a partir de rotômetros, permitem o controle da saída do ar das câmaras. O esquema da câmara é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Sistema dos equipamentos utilizados na carbonatação acelerada



Fonte: Werle (2010, p. 86)

A parte interna da câmara de carbonatação possui prateleiras feitas em malhas metálicas, permitindo a passagem do ar através destas no sentido vertical. A entrada do gás na câmara se dá pela parte superior e, para homogeneização interna, há 4 ventoinhas internas distribuídas em diferentes pontos.

Para verificação do percentual de CO_2 interno das câmaras, foi utilizado equipamento medidor *INDIGO201* da marca Vaisala, que se conecta por um cabo à sonda modelo GMP251, vistos na Figura 31 e Figura 32, respectivamente. A sonda possui uma ponta para conexão com o display e outra ponta com um filtro mede a concentração do gás, por isso ela permanece na parte interna da câmara durante a carbonatação. Dentro da câmara também permaneceram sensores de umidade e temperatura, que foram monitorados periodicamente.

Figura 31 – Display do medidor de CO₂ utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 32 – Sonda para medição da concentração percentual de CO₂



Fonte: Elaborado pela autora

Para manutenção da umidade interna da câmara foram colocados recipientes contendo solução supersaturada de cloreto de sódio, conforme indica Greenspan (2013).

Os agregados foram mantidos sob carbonatação pelo período de 14 dias. Ao serem retirados, a profundidade de carbonatação foi confirmada por meio do rompimento de amostras e aspersão de fenolftaleína. Após carbonatados, os agregados foram armazenados em sacos plástico e protegidos do ambiente.

3.2.7. Água

A água utilizada para a execução dos concretos e ensaios foi proveniente da rede de abastecimento da cidade de São Leopoldo, RS.

3.3. Produção dos concretos

Neste item estão descritos a forma de determinação dos traços de concreto, o consumo de materiais, a execução das misturas e a moldagem e cura dos corpos de prova.

3.3.1. Determinação dos traços

Nessa pesquisa foram desenvolvidos concretos com teor de argamassa de 55%, e teor de umidade de 9%. Esse teor de umidade foi definido para que se tenha uma maior

consistência inicial tanto para os ensaios de resistividade elétrica no estado fresco quanto para os ensaios de abatimento ao longo do tempo. Foram adotadas as relações água/cimento 0,45, 0,55 e 0,65, utilizadas no trabalho de Braun (2015) e Hentges, Kulakowski e Mancio (2015), que também empregaram a resistividade elétrica no estado fresco, de forma a poder obter possíveis comparações nos resultados obtidos.

O teor de substituição do AGN por AGRC neste trabalho foi de 25%. Esse valor foi adotado por levar-se em consideração os teores médios de substituição permitidos pela maioria das normas apresentadas na Tabela 5 e com vistas a manter os valores utilizados nos trabalhos do grupo de pesquisa. Esta substituição foi calculada substituindo-se a massa do agregado natural e fazendo-se a compensação em volume do agregado reciclado, conforme indicado na Equação 15.

$$M_{AGRC} = \frac{M_{AGN}}{\gamma_{AGN}} \times \gamma_{AGRC} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

M_{AGRC} – massa de agregado graúdo reciclado de concreto;

M_{AGN} – massa de agregado graúdo natural;

γ_{AGRC} – massa específica do agregado graúdo reciclado de concreto;

γ_{AGN} – massa específica do agregado graúdo natural.

Os traços determinados e os consumos de materiais estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Traços unitários e consumo de materiais

Traço Unitário (kg)	AGRC (%)	Relação a/c	Consumos (kg/m ³)					Aditivo AEH
			Cimento	AM	AGN	AGRC	Água	
1:1,75:2,25	0	0,45	435	761	978	0	196	0,870
1:2,36:2,75	0	0,55	355	837	975	0	195	0,710
1:2,97:3,25	0	0,65	300	890	973	0	195	0,600
1:1,75:2,25	25	0,45	435	761	734	203	196	0,870
1:2,36:2,75	25	0,55	355	837	732	202	195	0,710
1:2,97:3,25	25	0,65	300	890	730	201	195	0,600

Fonte: Elaborada pela autora

3.3.2. Execução das misturas

As misturas foram executadas no laboratório de materiais de construção da Unisinos em betoneira de eixo vertical. Antes destas, foi realizada imprimação da betoneira com

argamassa de mesmo traço dos concretos. No momento da mistura dos concretos, os materiais foram colocados na seguinte ordem:

1. Agregado graúdo natural;
2. 1/3 da água + aditivo estabilizador de hidratação;
3. Cimento – início da contagem do tempo;
4. 1/3 da água;
5. Areia – aos dois minutos de mistura;
6. 1/3 da água;
7. AGRC – aos 4 minutos de mistura.

Optou-se pela inserção do AGRC ao final da mistura para que as alterações causadas pelo mesmo sejam medidas com o menor tempo possível do início de sua influência, considerando os resultados encontrados por Nogueira (2015) comentados no item 2.2.1.

A consistência inicial dos concretos foi determinada sempre aos 6 minutos de mistura para todos os traços com o ensaio de abatimento de tronco de cone. Após isso, foi realizado ajuste do abatimento, quando necessário, com aditivo superplastificante. Para evitar influências significativas nos resultados, a temperatura e umidade foram constantemente monitoradas e as moldagens foram realizadas sempre com umidade mínima de 60%, acionando-se o sistema de climatização evaporativa com água quando ocorria redução da umidade ao longo do ensaio.

3.3.3. Moldagem e cura dos corpos de prova

Assim que o abatimento alcançou o valor de 120 ± 20 mm, foi realizada a homogeneização da mistura do concreto e foram moldados os corpos de prova na ordem:

1. Dois baldes cilíndricos para a realização da resistividade elétrica no estado fresco com volume de concreto de 170 x 250 mm;
2. Seis corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm para resistência à compressão aos 7 e 28 dias;
3. Dois corpos de prova prismáticos de 60 x 60 x 180 mm para absorção de água por capilaridade;
4. Um balde com o restante do concreto para execução da perda de abatimento ao longo do tempo.

O procedimento de moldagem e cura dos corpos de prova seguiu a padronização da NBR 5738 (ABNT, 2015). Os corpos de prova prismáticos para o ensaio de absorção de água

por capilaridade foram cortados em fatias de 30 mm perpendiculares ao longo do eixo após 28 dias de cura. A secagem e interrupção da cura até o momento de ensaio foi feita em estufa a 60° C.

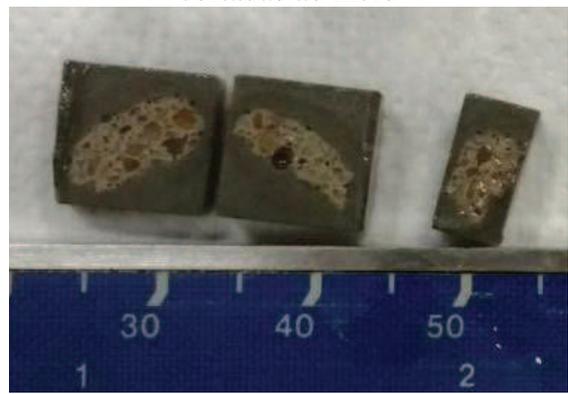
Para as análises microestruturais, as amostras utilizadas foram moldadas em forma de silicone com espaçamento de 1x1x1 cm (Figura 33), não tendo sido utilizado desmoldante. Para elaboração das amostras a serem analisadas, primeiramente foram dispostos os agregados secos e, após, colocada argamassa de cimento e pó de quartzo na proporção 1:1, com relação a/c 0,45. A consistência da pasta foi ajustada com aditivo superplastificante até atingir fluidez necessária para envolver todo o agregado. Tal fluidez foi determinada em testes piloto.

Figura 33 – Forma para amostras de 1x1x1 cm com agregados posicionados



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 34 – Amostras desmoldadas e cortadas ao meio



Fonte: Elaborada pela autora

Após colocadas as argamassas na forma, esta foi agitada por um minuto para a conformação e remoção de ar aprisionado. Durante a cura, a forma permaneceu coberta com uma placa de vidro e levada em sala com temperatura e umidade controlada de $21 \pm 2^\circ \text{C}$ e 95%, respectivamente.

Ao atingirem a idade de cura, as amostras foram desmoldadas e cortadas ao meio em serra de precisão, de forma que ficasse uma superfície lisa com uma seção de agregado reciclado – zona de transição – argamassa, conforme apresentado na Figura 34.

A interrupção da cura foi realizada submergindo as amostras em álcool isopropílico por 7 dias, tendo-se realizada troca do líquido nas primeiras 24 horas. (SCRIVENER et al., (2016). Após isso, as amostras foram colocadas em recipientes vedados contendo sílica gel, a qual também foi trocada quando apresentou coloração rosada.

3.4. Métodos

Os métodos empregados nesta pesquisa relacionados aos agregados reciclados foram: o tratamento pozolânico, a carbonatação, a absorção de água e a determinação do teor de argamassa. Os métodos utilizados para a caracterização dos concretos são: a perda de abatimento ao longo do tempo, a resistividade elétrica no estado fresco, a resistência à compressão axial, a absorção de água por capilaridade e a caracterização microestrutural. Por fim, foi realizado cálculo da geração de CO₂ por parte dos agregados graúdos e do sequestro de gás carbônico por meio da carbonatação dos AGRCs.

3.4.1. Absorção de água dos agregados

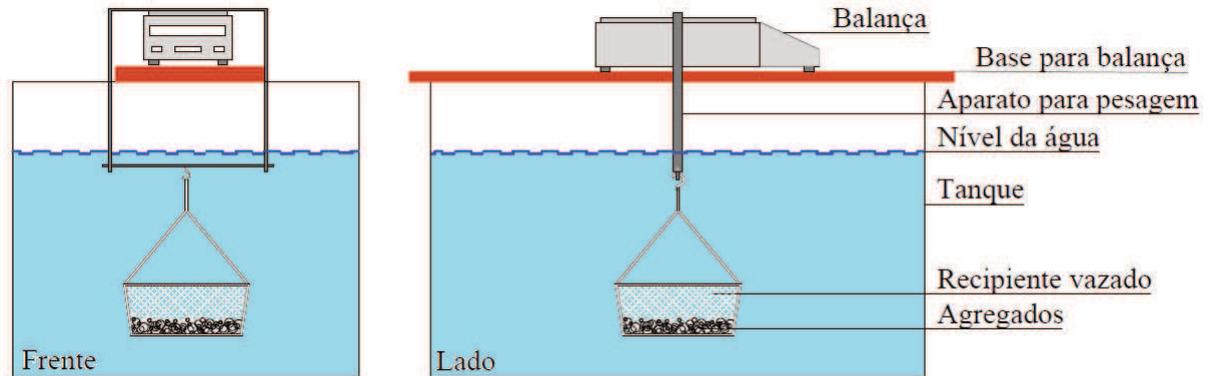
A absorção de água do AGRC foi desenvolvida com vistas à comparação das diferenças na porosidade interna dos agregados causadas pelos tratamentos empregados.

Neste estudo foi adotado o método utilizado por Werle (2010), adaptado de Leite (2001), sendo realizado o ensaio em duas amostras de cada agregado graúdo empregado na pesquisa. Para isso, as amostras de 500 g foram previamente secas em estufa a 60° C e resfriadas à temperatura ambiente em recipientes fechados. As amostras utilizadas respeitaram a curva granulométrica adotada nas moldagens.

O ensaio consistiu em colocar as amostras em recipientes vazados, submergi-las em água à temperatura ambiente e determinar a massa no momento da submersão da amostra (tempo 0), em 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas.

Para realizar as leituras, é enchido um tanque com água e, na parte superior deste, é colocada uma base para apoio da balança. Para pesagem da amostra submersa, é posicionado um arco metálico sobre a balança e, neste, acoplado um gancho para pendurar o recipiente vazado contendo os agregados. O sistema arco + gancho é inicialmente tarado e a massa do recipiente vazado é obtida ao final do ensaio. Este esquema é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Esquema de montagem para o ensaio de absorção de água dos agregados



Fonte: Elaborado pela autora

A determinação da absorção percentual é feita dividindo-se o aumento de massa, em gramas pela massa inicial da amostra, descontando-se a massa da cesta. A taxa de absorção para cada momento de leitura foi obtida dividindo-se a absorção percentual pela raiz do tempo em minutos. Nos resultados são apresentadas as taxas de absorção médias ao longo do tempo.

3.4.2. Abatimento de tronco de cone

A consistência dos concretos foi determinada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998) no LMC da Unisinos e, juntamente com este ensaio, foi realizado monitoramento da perda de abatimento conforme NBR 10342 (ABNT, 2012) com o objetivo de verificar a perda de trabalhabilidade que se dá pela absorção de água do agregado reciclado, tendo em vista que as misturas foram compostas de aditivo estabilizador de hidratação.

Como forma de padronização do início do ensaio, foi determinado que todos os concretos partiriam de uma consistência de 120 ± 20 mm e, para isso, foi empregado aditivo superplastificante. Essa padronização se deu, também, devido às alterações de temperatura e umidade que ocorreram.

Conforme comentado no passo 4) do item 3.3.3, o concreto empregado para o monitoramento da perda de abatimento ao longo do tempo foi armazenado em um recipiente cilíndrico plástico e, para evitar perdas de água, entre as leituras foi mantida uma tampa de madeira revestida com adesivo plástico (Figura 36). Nessa tampa foram inseridos ganchos para colocação e remoção dentro do recipiente. Acima do recipiente foi mantido um pano úmido com o objetivo de minimizar a diferença de umidade entre o concreto e o ambiente externo.

Figura 36 – Recipiente e tampa utilizados para ensaio de abatimento ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pela autora

3.4.3. Resistividade elétrica no estado fresco

Nesta pesquisa, o método da resistividade elétrica no estado fresco foi empregado para analisar as alterações nas misturas causadas pela absorção de água do AGRC. Assim, este ensaio foi utilizado como forma de complemento e comparação com os resultados obtidos nos testes de abatimento de tronco de cone ao longo do tempo.

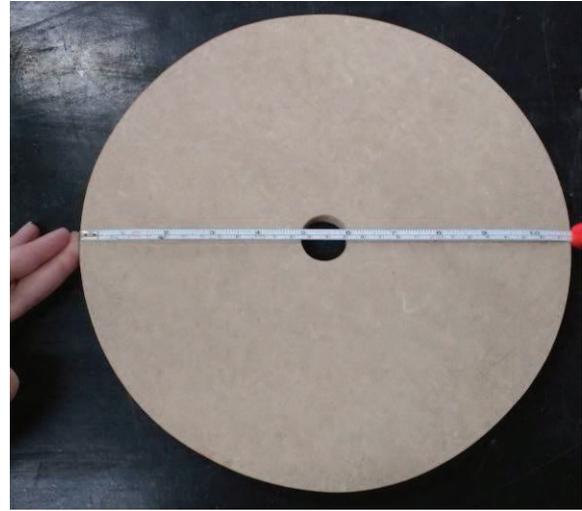
Durante o ensaio, as amostras de concreto contidas nos recipientes cilíndricos foram cobertas com tampa de madeira revestida com adesivo plástico e com um furo ao centro para permitir a inserção da sonda sem remover a tampa. O recipiente e tampa utilizados neste trabalho são vistos na Figura 37 e na Figura 38.

Figura 37 – Recipiente plástico utilizado para resistividade elétrica



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 38 – Tampa desenvolvida para evitar a perda de água durante o ensaio de resistividade elétrica no estado fresco



Fonte: Elaborada pela autora

Os equipamentos e o esquema de montagem utilizados durante o ensaio foram conforme apresentados no item 2.3.4. As leituras foram iniciadas a partir do momento em que se alcançou o abatimento de 120 ± 20 mm (passo 1 do item 3.3.3) e, a partir de então, foram executadas a cada 10 minutos nas duas amostras de cada traço. Para a determinação dos resultados, foi realizada calibração prévia da sonda utilizada conforme procedimento adotado e descrito em Braun (2015) e Hentges, Kulakowski e Mancio (2015).

Trabalhos anteriores demonstraram que a hidratação do cimento pode apresentar influência na resistividade elétrica do concreto no estado fresco (BRAUN, 2015; HENTGES; KULAKOWSKI; MANCIO, 2015, NOGUEIRA, 2015; WEI; LI, 2006). Para isolar esse efeito e, buscando-se analisar apenas alterações causadas pela presença do AGRC nos concretos, o aditivo estabilizador de hidratação foi incorporado de forma igual para todos os traços. Kautzmann et al. (2017) mostram que este aditivo tende a minimizar variação da resistividade elétrica nos concretos com e sem AGRC. Os autores mostraram, também, que há manutenção na tendência da resistividade elétrica na terceira hora de ensaio e, por isso, nesta pesquisa foram realizadas leituras apenas nas primeiras duas horas de ensaio.

3.4.4. Resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova foi realizada aos 7 e aos 28 dias conforme NBR 5739 (ABNT, 2007), tendo sido moldados três corpos de prova de

cada traço para cada idade. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Segurança Estrutural (LaSE) do ITT Performance na Unisinos. Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram retificados junto à base e topo.

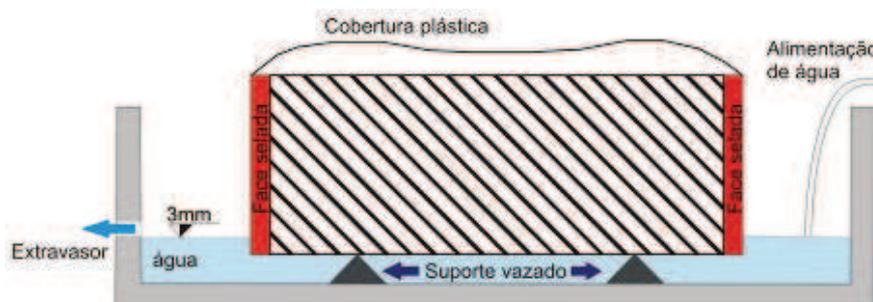
3.4.5. Absorção capilar dos concretos

O ensaio de absorção de água por capilaridade executado conforme RILEM TC 116 PCD modificado por Werle (2010). Foram excluídas as extremidades dos prismas para evitar interferências.

A preparação da amostra para o ensaio consistiu na impermeabilização das faces laterais com fita de forte aderência e a cobertura da face superior foi revestida com látex não aderido à superfície, permitindo a saída de ar na parte superior da amostra causada pela absorção de água na parte inferior.

Na Figura 39 é apresentado um esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade, onde é ilustrado que as amostras são colocadas em estrados dentro de bandejas plásticas de forma que a água esteja a uma altura de 3 mm da base das amostras. A bandeja utilizada no ensaio possui aberturas nas laterais para que o nível de água não seja elevado e o abastecimento de água foi constante manter o nível de água.

Figura 39 – Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade



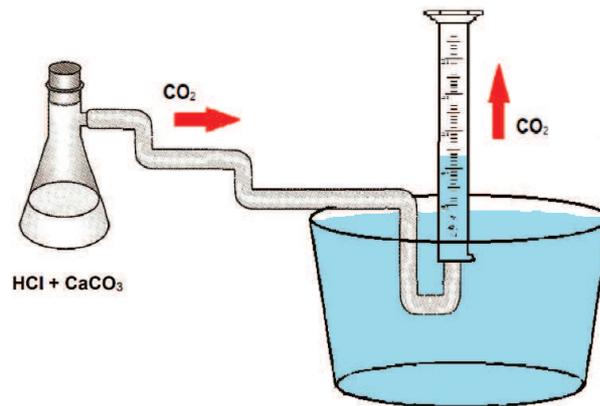
Fonte: Werle (2010, p. 76)

As medidas de massas das amostras foram executadas em 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas, além da massa seca determinada antes do ensaio com e sem impermeabilização. Para essas medidas, as amostras foram retiradas da água, secas suavemente em pano úmido para remover o excesso de água e, então, foi determinada a massa.

3.4.6. Determinação do sequestro de CO₂ pelos agregados reciclados

Para a determinação do teor de CO₂ consumido através da carbonatação dos agregados reciclados, foi empregado método de análise química baseado no livro de Szpoganicz, Debacher e Stadler (2005), ilustrado na Figura 40, onde os seguintes passos foram adotados:

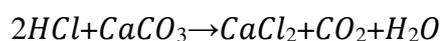
Figura 40 – Esquema para determinação química do CO₂ consumido na carbonatação



Fonte: Kautzmann (2018)

1. Foi enchido uma proveta com água e esta foi colocada com a boca para baixo em recipiente com água para impedir a entrada de ar;
2. Conectada uma extremidade de uma mangueira de látex na saída superior de um kitassato e colocada a outra extremidade na parte interna da proveta;
3. Inserido 3,667 gramas de agregado reciclado carbonatado moído no kitassato;
4. Inserido aproximadamente 20 ml de ácido clorídrico (HCl) no kitassato e vedado imediatamente o bocal com rolha;
5. Medido o volume de CO₂ que foi gerado e armazenado na proveta através da mangueira de látex após a reação do HCl com o CaCO₃ presente no AGRC;
6. Calcular a massa de CO₂ em relação à massa de agregado reciclado sabendo-se que 1 mol de gás corresponde a 22,4 litros.

Na Equação 16 é apresentada a reação descrita acima.



Equação 16

3.4.7. Análise microestrutural

Foi realizada análise microestrutural de amostras que empregam agregado reciclado tratado com carbonatação e com imersão em solução de MCV. As análises realizadas nesta pesquisa foram em microscópio eletrônico de varredura junto ao itt Fuse.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada com o objetivo de

- a) verificar alterações na a zona de transição entre argamassa e agregado graúdo possivelmente ocasionadas pelos tratamentos empregados;
- b) analisar o resultado dos tratamentos na superfície interna do AGRC.

A metalização das amostras foi realizada com ouro e a fixação ao porta-amostra foi feita com fita adesiva condutora de carbono.

3.4.8. Análise estatística dos resultados

Para análise estatística dos resultados e tratamento de dados, foi empregada análise de variância (ANOVA), com um nível de confiança α de 95%. Esse procedimento foi adotado para verificar a influência significativa ou não dos fatores de controle adotados na pesquisa sobre as variáveis de resposta. Estas análises foram realizadas do software *Statistica 12*, em sua versão de demonstração.

Tendo em vista que o objetivo do trabalho é verificar a influência do tratamento dos agregados reciclados, os valores empregados para a análise estatística consideraram apenas os resultados que envolviam agregados graúdos reciclados de referência (AGRC-R), agregados graúdos reciclados com pozolana (AGRC-P) e agregados graúdos reciclados carbonatados (AGRC-C). Com o intuito de analisar o comportamento de concretos sem agregados reciclados, os gráficos apresentam também os resultados dos concretos AGN.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

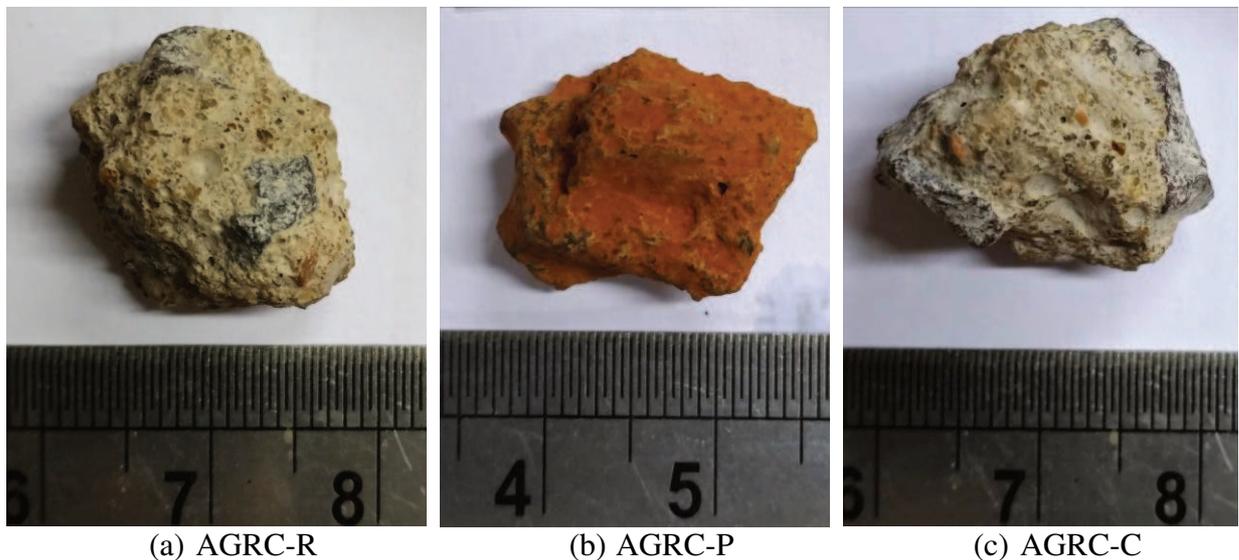
Neste capítulo são apresentados os resultados de análise microestrutural, absorção de água dos agregados, resistividade elétrica dos concretos no estado fresco, perda de abatimento ao longo do tempo, absorção de água por capilaridade, resistência à compressão e microestrutura dos concretos executados com os agregados graúdos reciclados e naturais.

4.1. Tratamento dos agregados

4.1.1. Aspecto geral dos agregados reciclados

Inicialmente é apresentada a aparência dos agregados reciclados antes e após os tratamentos empregados. Na Figura 41 são apresentados (a) o agregado graúdo reciclado de concreto de referência, sem tratamento (AGRC-R), (b) o agregado graúdo reciclado de concreto após a impregnação com material pozolânico oriundo de resíduo de cerâmica vermelha (AGRC-P), e (c) o agregado graúdo reciclado de concreto após a carbonatação (AGRC-C).

Figura 41 – Aparência dos agregados reciclados utilizados nesta pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora

A superfície externa do AGRC-P apresentou alteração em sua coloração devido ao processo de tratamento com MCV. Verifica-se a formação de depósitos de MCV na superfície do agregado, bem como em poros e em fissuras. Um acúmulo maior de pó é percebido nas regiões em que são identificadas falhas de interface entre agregado e argamassa e regiões

onde evidencia-se concavidades geradas pelo descolamento do agregado natural, expondo uma antiga zona de transição. A partir do manuseio deste agregado, percebeu-se que parte dos microfios de cerâmica vermelha presentes na superfície do agregado desprendiam-se, ficando depositados nos recipientes utilizados e soltavam-se nas misturas de concreto. De forma contrária, o processo de carbonatação acelerada não incorre em mudanças visíveis a olho nu nos agregados reciclados, sendo observada apenas uma coloração ligeiramente mais clara, quando comparada ao agregado sem tratamento.

4.1.2. Massa específica

As massas específicas dos agregados reciclados, com e sem tratamentos, são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Massas específicas dos agregados após tratamento

Agregado	AGN	AGRC-R	AGRC-P	AGRC-C
Massa específica (g/cm ³)	2,58	2,48	2,49	2,55

Fonte: Elaborada pela autora

O aumento de massa específica gerado pelo tratamento pozolânico de 0,4%, que pode ser confundido com um possível erro de medida do método. Isso porque há uma tendência de aumento na massa específica a partir da ocorrência de reação pozolânica dos MCV com os produtos de hidratação do cimento presentes nos poros dos agregados. Neste sentido, Allen, Thomas e Jennings (2008) afirmam que há uma influência da relação Ca/Si na densidade do gel de CSH, ressaltando, no entanto, que os valores massivamente obtidos na literatura estão entre 2,603 e 2,604 g/cm³. Ou seja, o CSH gerado na reação pozolânica poderia levar a um aumento da massa específica do agregado reciclado. Tendo sido o AGRC seco após 7 dias da impregnação com MCV, é possível que não tenha sido proporcionado intervalo de tempo e condições de umidade adequadas para que ocorresse a reação pozolânica previamente à sua caracterização e incorporação no concreto.

Para o AGRC-C o aumento da massa específica foi de 2,8 % após o tratamento por carbonatação. Verifica-se que há uma tendência de aumento nessa característica que pode ser relacionado à precipitação de carbonato de cálcio nos poros dos agregados, que apresenta em média uma densidade de 2,71 g/cm³. (MATSCHEI; LOTHENBACH; GLASSER, 2007). Esse resultado apresenta a mesma tendência de comportamento das amostras estudadas por Zhao et

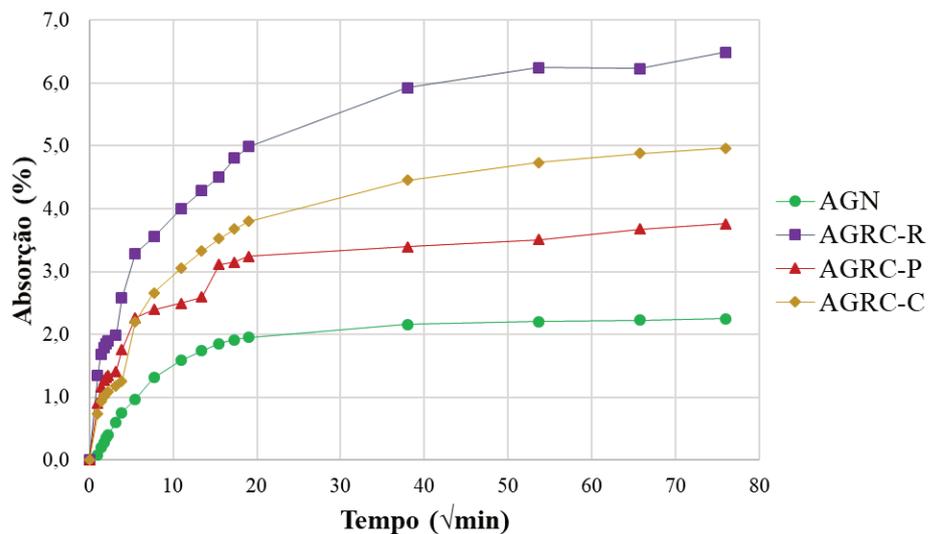
al. (2016), cujos resultados indicaram um aumento médio de 4,4% na massa específica, com os maiores valores observados para as frações de menor dimensão.

Assim, verifica-se que a massa específica se apresentou similar para todos os agregados estudados, sendo que a carbonatação acarretou em um agregado com massa específica mais próxima à do agregado natural.

4.1.3. Absorção de água dos agregados

A absorção de água total ao longo do tempo dos agregados pode ser vista na Figura 42.

Figura 42 – Absorção de água ao longo do tempo dos agregados

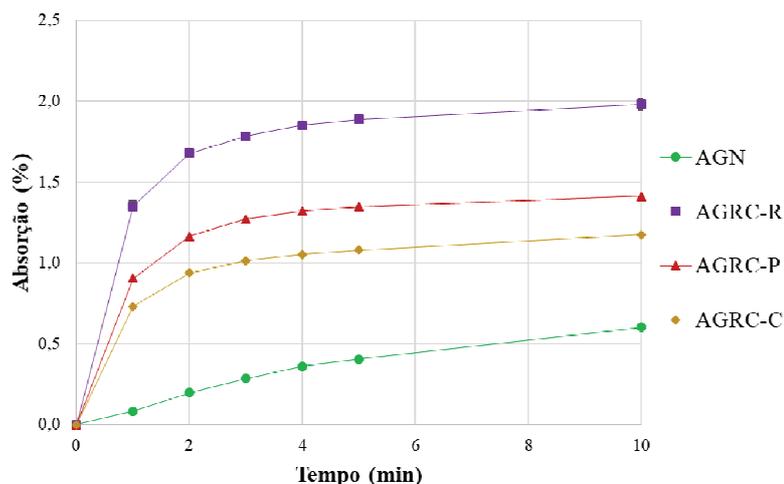


Fonte: Elaborada pela autora

Verifica-se nas amostras de agregados reciclados alguns pontos de aumento brusco da absorção, que podem ser devidos à liberação de bolhas de ar aprisionadas entre os agregados. Essa situação é caracterizada como um efeito da imprecisão do método estudado por Quattrone et al. (2016), que indicam melhorias no método.

Para melhor visualização dos minutos iniciais de absorção dos agregados empregados na pesquisa, a Figura 43 apresenta as curvas de evolução da absorção de água nos primeiros 10 minutos de ensaio.

Figura 43 – Absorção média nos minutos iniciais dos agregados graúdos



Fonte: Elaborada pela autora

Conforme esperado, o AGN apresentou a menor absorção de água em todo o período de ensaio e os maiores valores foram observados para o AGRC-R. No período inicial de 10 minutos, conforme pode ser visto na Figura 43, bem como ao longo do tempo até 30 minutos (Figura 42) o agregado carbonatado foi o que teve a menor absorção de água. Porém, após 30 minutos de ensaio, o AGRC-P passou a apresentar valores de absorção menores do que o AGRC-C.

A absorção de água aos 10 minutos, em duas horas, em 24 horas e ao final do ensaio (96 horas) é apresentada na Tabela 16. O destaque conferido aos valores de absorção de água em 10 minutos, visam a uma eventual análise de viabilidade para emprego em uma empresa de pré-fabricados, com ciclo de concretagem de 10 a 15 minutos (CAVALHEIRO, 2011). Já a análise da absorção de água em 2 horas refere-se à análise para um eventual emprego em empresa de serviços de concretagem.

Tabela 16 – Absorção de água dos agregados aos 10 minutos, 2 horas, 24 horas e total

Tempo	AGN	AGRC-R	AGRC-P	AGRC-C
10 minutos	0,601	1,980	1,414	1,175
2 horas	1,587	3,996	2,492	3,051
Total	2,247	6,493	3,759	4,965

Fonte: Elaborada pela autora

Para a absorção total, percebe-se que o tratamento pozolânico se mostrou mais efetivo, tendo reduzido 42% do valor, já a carbonatação reduziu a absorção em 23%. Para o momento de dez minutos a carbonatação foi mais efetiva, tendo minimizado em 41% a absorção de água em relação ao AGRC-R, enquanto que a imersão em pozolana fez com que essa

diminuição fosse de 29%. No entanto, enquanto o AGRC-R possui uma absorção de água 3,3 vezes maior que o AGN, a carbonatação faz com que esta diferença seja reduzida, o que poderia diminuir o consumo de aditivos plastificantes se empregado em pré-fabricação.

Em duas horas de ensaio, a redução da absorção dos agregados foi de 38% para o AGRC-P e de 24% para o AGRC-C. Assim, se a análise de viabilidade técnica fosse realizada para emprego de concretagens in loco dever-se-ia recomendar, entre as opções estudadas, o tratamento com MCV.

Como discutido na revisão bibliográfica, a carbonatação tende a colmatar os poros da superfície, sem alterar significativamente a estrutura em regiões de maior profundidade. O comportamento de absorção de água nos agregados carbonatados, dessa forma, pode ser explicado pelo maior preenchimento dos poros próximos à superfície do agregado, com menos precipitação de carbonatos quando do aumento da profundidade. Assim, os poros responsáveis pela absorção inicial estando mais preenchidos pelos produtos de carbonatação podem ter diminuído esta absorção, o mesmo não sendo observado para a absorção em períodos maiores. Entretanto, não foi realizada análise do volume de produtos de carbonatação ao longo da espessura do AGRC-P.

O refinamento dos poros também foi percebido no AGRC-P, situação que pode ter ocorrido de forma mais uniforme ao longo da espessura do agregado, quando comparada ao tratamento com CO₂. Para o AGRC-P é provável que o refinamento dos poros tenha acelerado a absorção inicial por inferir um refinamento na estrutura de poros, com diminuição de dimensões e aumento do número de poros capilares, porém de maneira mais uniforme ao longo da espessura do agregado, induzindo a uma menor absorção de água a partir dos 30 minutos de ensaio quando comparado com o AGRC-C.

Verifica-se que os valores de absorção total dos agregados ficam próximos da literatura apresentada em 2.1.2.1. Quando observada a Tabela 4, nota-se que o AGRC-R apresentou absorção total correspondente ao material utilizado por Güneyisi et al. (2016), sendo que o concreto de referência dos pesquisadores também possuía resistência na faixa dos 20 MPa. A partir do tratamento pozolânico, a absorção alcançada pelo AGRC-P passa a ficar no nível do agregado reciclado utilizado por Matias et al. (2013), que é proveniente de laje de estádio com mais de 50 anos, ou seja, com uma hidratação avançada do cimento e porosidade bastante reduzida. O tratamento dos agregados reciclados com CO₂, não apresentou uma redução tão significativa quanto a dos AGRC-P, porém alcançou valores similares aos de Limbachiya, Leelawat e Dhir (2000), cujos agregados apresentaram uma das absorções mais baixas da Tabela 4.

Na Tabela 17 é apresentada a análise de variância para a absorção dos agregados reciclados ao longo do tempo. Foram adotados como fatores de controle o tipo de agregado reciclado (AGRC) e o tempo de ensaio (Tempo) em minutos.

Tabela 17 – Análise de variância (ANOVA) para a absorção dos AGRC

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P
Intercepção	191,1164	1	191,1164	2063,847	0,000000
AGRC	37,8515	2	18,9257	204,377	0,000000
Tempo	8,0376	2	4,0188	43,399	0,000024
AGRC*Tempo	2,4692	4	0,6173	6,666	0,008891
Error	0,8334	9	0,0926		

Onde: SQ = soma quadrada; gl = grau de liberdade; MQ = média quadrada; F= razão entre modelo e erro; P = nível de probabilidade; Preto= não significativo; Vermelho = significativo

Fonte: Elaborada pela autora

Verifica-se que os tratamentos feitos com os agregados reciclados apresentaram efeitos significativos com relação às diferenças encontradas na absorção de água, o que se esperava após verificar uma redução de quase 50% na absorção total. O tempo de leitura da absorção também se mostrou significativo, o que se verifica quando analisada a evolução da absorção ao longo do tempo de leitura.

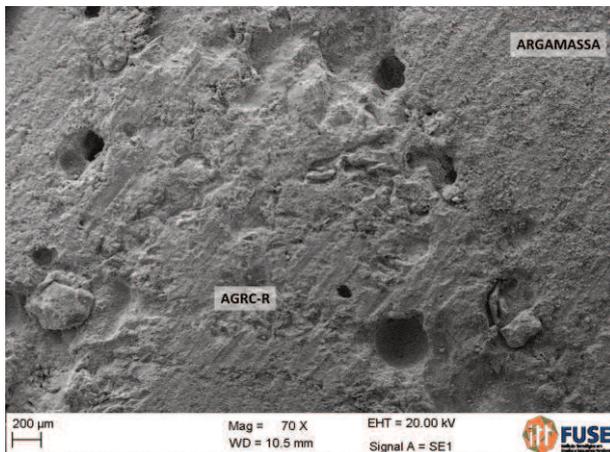
Assim, percebe-se que os tratamentos exibiram melhorias significativas na absorção de água dos agregados reciclados. A carbonatação apresentou os melhores resultados para os minutos iniciais de ensaio e o tratamento pozolânico se mostrou mais efetivo para períodos de tempo maiores de absorção.

4.1.4. Análise microestrutural

Tendo em vista que o objetivo principal deste trabalho é a análise do tratamento do agregado reciclado, são apresentadas aqui apenas imagens obtidas por MEV das amostras contendo agregado reciclado.

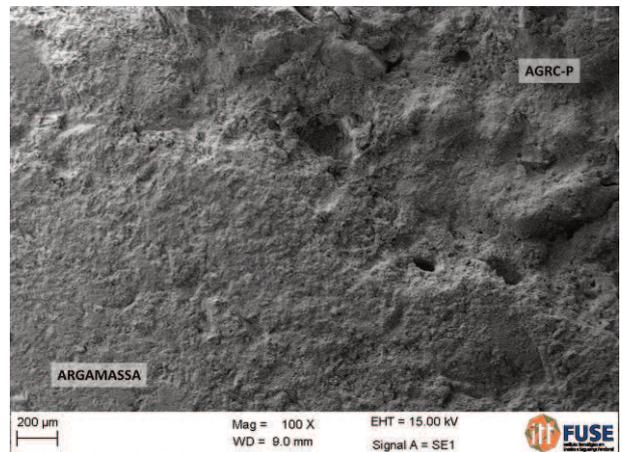
Durante as análises por MEV, foi percebido diferenças na rugosidade superficial dos agregados, principalmente quando comparada à da nova argamassa de cimento e quartzo. Dessa forma, são apresentadas na Figura 44, na Figura 45 e na Figura 46 imagens com ampliações de 70 vezes para o AGRC-R e de 100 vezes para o AGRC-P e AGRC-C.

Figura 44 – Imagem MEV da interface entre AGRC-R e nova argamassa (aumento de 70x)



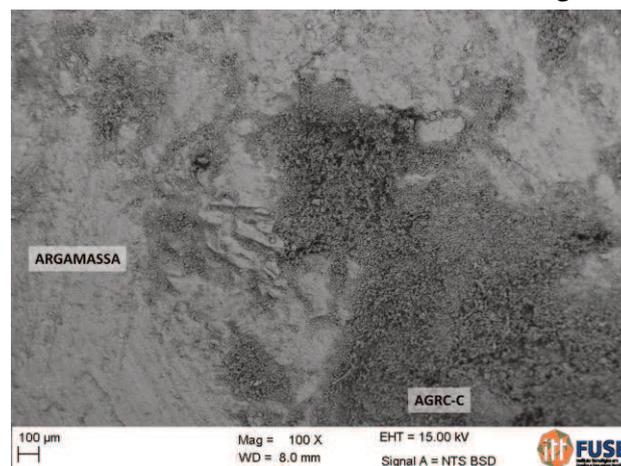
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 45 – Imagem MEV da interface entre AGRC-P e nova argamassa (aumento de 100x)



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 46 – Imagem MEV da interface entre AGRC-C e nova argamassa (aumento de 100x)



Fonte: Elaborada pela autora

Percebe-se que o AGRC-R apresenta uma superfície irregular com poros de maiores dimensões tanto internamente quanto na interface entre agregado e argamassa nova. Tais poros podem ser do próprio AGRC, como pode ser visto também ao centro do AGRC-R na Figura 41, ou terem sido aprisionados durante a moldagem das amostras.

Após o tratamento pozolânico, a superfície do AGRC-P passou a apresentar uma maior uniformidade e compacidade quando comparada à do AGRC-R. Esse efeito é percebido tanto no próprio agregado quanto na interface entre agregado e argamassa nova, áreas em que não são mais identificados poros de maiores dimensões como eram no agregado de referência. Na zona de transição são percebidos alguns poros medianos, que também podem ter sido aprisionados, porém tiveram sua dimensão reduzida a partir da reação pozolânica de MCV na superfície do agregado. Além disso, a análise da superfície sugere que a maior regularidade é

devida à presença de partículas de menor dimensão. Vale lembrar que esta superfície corresponde à uma seção do agregado, o que indica que o tratamento atingiu os poros internos do agregado.

Com relação ao AGRC-C, percebe-se pela Figura 46 que houve alteração na superfície do agregado carbonatado quando comparado com o agregado de referência. A partir da carbonatação, é percebida uma superfície mais regular, sem a presença de poros de maior dimensão, porém contendo partículas de menor dimensão, indicando ser produtos de carbonatação. A presença destes é verificada sob a forma de regiões com maior densidade de produtos e outras regiões com menor densidade, mais porosas e com coloração mais escura.

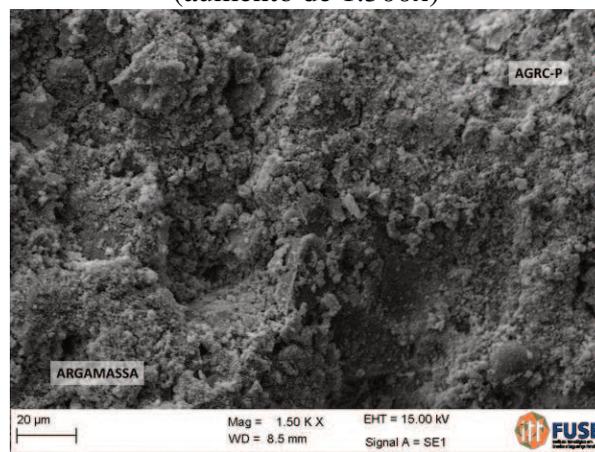
Foi dada uma maior ampliação na zona de transição entre agregado e argamassa nova. As imagens obtidas são apresentadas na Figura 47, na Figura 48 e na Figura 49. Observa-se que o aumento ficou em 1000 vezes para o AGRC-R e para o AGRC-C e de 1500 vezes para o AGRC-P.

Figura 47 – Imagem MEV da zona de transição entre AGRC-R e nova argamassa (aumento de 1.000x)



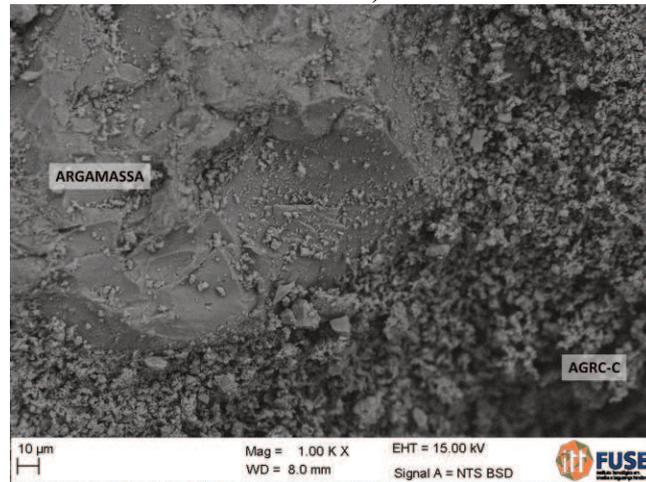
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 48 – Imagem MEV da zona de transição entre AGRC-P e nova argamassa (aumento de 1.500x)



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 49 – Imagem MEV da zona de transição entre AGRC-C e nova argamassa (aumento de 1.000x)



Fonte: Elaborada pela autora

Na Figura 47 é identificada a presença de grande quantidade de partículas soltas na superfície, e estas assentaram-se também nos poros da zona de transição, não deixando nítida a espessura desta. Entretanto, nos pontos visíveis, identifica-se a espessura média de 0,7 mm.

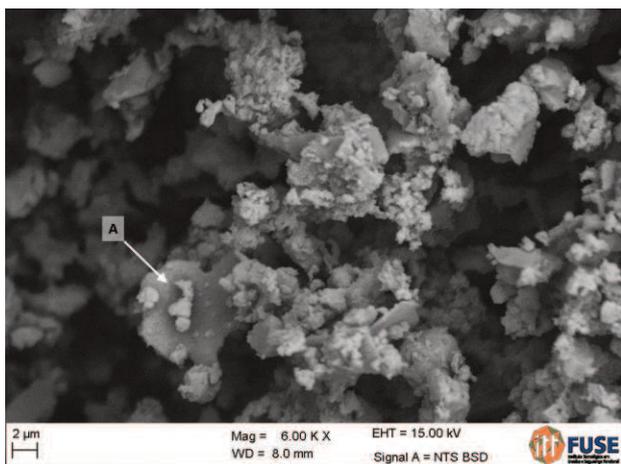
Mais uma vez, para o AGRC-P, são percebidas partículas com dimensões menores, indicando a reação do material pozzolânico. Nas análises do AGRC-P, a zona de transição entre agregado e argamassa passou a ser mais difícil de ser detectada durante as análises. Isso porque parece que os MCV preencheram esta região mais porosa e reagiu com os produtos de hidratação da nova matriz cimentícia. O que sugere isso, também, é o que se percebe na Figura 48, onde a parte superior esquerda apresenta fissuras da zona de transição que não possuem continuidade.

Na Figura 49 é verificado que a zona de transição parece apresentar uma estrutura de menor densidade quando comparada à do AGRC-P. Entretanto, são observadas partículas aderidas à nova argamassa que não foram observadas para as outras amostras, indicando que estas sejam produtos da carbonatação.

Com o intuito de verificar se as partículas verificadas na superfície do AGRC-C são, de fato, produtos da carbonatação do AGRC, foram dadas ampliações maiores no MEV em postos na superfície do AGRC-C. Na Figura 50 e na Figura 51 são apresentados as imagens obtidas a partir dessa análise, com aumentos de 6.000 vezes e de 15.000 vezes, respectivamente. Com base no que foi apresentado no item 2.3.1 deste trabalho, foram identificados produtos que se assemelham às formas de calcita apresentadas na revisão. A seta na Figura 50 indica a presença do que provavelmente é uma calcita no formato amorfo (A), em esférulas. Já a seta (E) da Figura 51 indica o formato escalenoedro e a seta (O) indica o

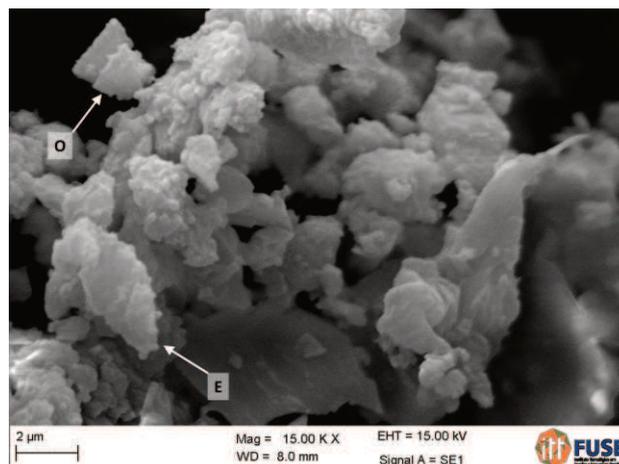
formato ortorrômbico, ambos encontrados em Cizer et al. (2012). Vale lembrar que, no trabalho dos autores, foram empregadas soluções puras de hidróxido de cálcio e água, o que gerou cristais mais bem definidos, diferente do resultado alcançado nesta pesquisa, onde foi empregado cimento, agregados e água.

Figura 50 – Imagem MEV dos produtos da carbonatação (aumento de 6.000 x)



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 51 – Imagem MEV dos produtos da carbonatação (aumento de 15.000 x)



Fonte: Elaborada pela autora

Destaca-se aqui, também, que durante as análises foram verificadas microfissuras em todas as amostras analisadas, sendo que a amostra com AGRC-R foi a que apresentou maior quantidade destas e a amostra com AGRC-P foi a com menos microfissuras. Com isso, pode-se entender que os processos de tratamento preencheram e fortaleceram as microfissuras existentes no agregado reciclado possivelmente geradas pelo processo de cominuição deste.

4.2. Concretos

4.2.1. Abatimento ao longo do tempo

Conforme descrito no item 3.3.2, foi realizado ajuste da consistência das misturas quando estas não atingiram o abatimento de 120 ± 20 mm. Dessa forma, os valores iniciais do ensaio de perda de abatimento ao longo do tempo foram padronizados e a absorção dos agregados nos primeiros minutos de não foi considerada nesse ensaio. Assim, são apresentados a Tabela 18 os fatores climáticos que havia no momento da mistura de cada traço de concreto, bem como o teor de aditivo superplastificante empregado para o alcance do abatimento inicial. O teor de aditivo é dado em relação à massa de cimento.

Tabela 18 – Fatores climáticos e aditivo para cada mistura de concreto

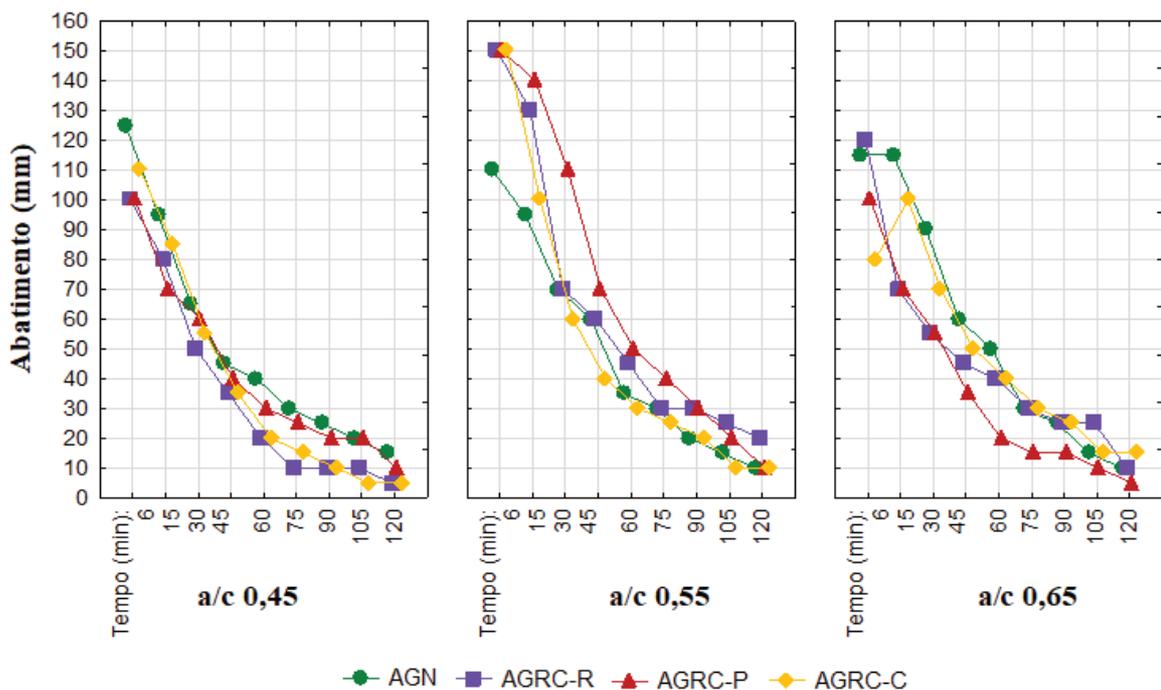
Relação a/c	Fator	AGN	AGRC-R	AGRC-P	AGRC-C
0,45	Temperatura (C°)	17,6	19,6	4,6	23,1
	Umidade Relativa (%)	87,0	62	73,0	79,0
	Aditivo (%)	0,203	0	0,084	0,133
0,55	Temperatura (C°)	20,3	15,5	17,2	19,0
	Umidade Relativa (%)	61,0	75,0	92,0	84,0
	Aditivo (%)	0,104	0	0,156	0,098
0,65	Temperatura (C°)	20,5	18,4	20,6	17,2
	Umidade Relativa (%)	83,0	72,0	90,0	61,0
	Aditivo (%)	0,195	0	0	0,084

Fonte: Elaborada pela autora

Nota-se que as moldagens foram feitas sempre com temperaturas na faixa dos 15° C aos 20° C, sendo que apenas a moldagem do AGRC-C com relação a/c 0,45 teve uma temperatura de 23° C. Outra moldagem com temperatura diferenciada foi a do traço AGRC-P com a/c 0,45, onde a temperatura foi de 4,6° C. Nesse caso, porém, a umidade relativa do ar estava em 73%, dentro do mínimo estipulado de 60%. Percebe-se que não houve influência direta da temperatura e da umidade na consistência dos concretos, pois houve necessidade de utilização de aditivo superplastificante tanto em temperaturas e umidades altas, quanto baixas.

A perda de abatimento ao longo do tempo dos concretos estudados é apresentada na Figura 52.

Figura 52 – Abatimento ao longo do tempo dos concretos estudados



Fonte: Elaborada pela autora

Percebe-se que houve comportamento similar para todos os concretos, sendo que o concreto contendo apenas agregados naturais apresentou as maiores consistências durante quase todo o ensaio para as relações a/c 0,45 e 0,65. As curvas são semelhantes às apresentadas por Poon et al. (2004), Kou e Poon (2010) e por Nogueira (2015), onde os autores também encontraram similaridade de abatimento para os traços executados. Ressalta-se que no trabalho de Kou e Poon (2010) também havia sido realizado tratamento dos agregados reciclados e a absorção de água característica dos mesmos apresentou redução de 61,6%. Ainda assim, as curvas se apresentaram similares durante todo o período de ensaio.

Nos concretos de relação a/c 0,55, nota-se que o traço composto por AGRC tratado com pozolana apresentou as maiores consistências, tendo reduzido ao final, nesse caso há possibilidade de que os MCV que se desprenderam na mistura tenham retido água por adsorção superficial ao longo do tempo de ensaio. O traço AGRC-R teve redução de 60 mm no abatimento entre os 15 e os 30 minutos de ensaio, ou seja, em 30 minutos de ensaio o concreto apresentou 47% do abatimento inicial. Esse efeito pode estar relacionado à alta absorção de água apresentada pelo agregado reciclado presente na mistura.

Os concretos de relação a/c 0,65 também apresentaram comportamento similar entre si. O concreto com AGRC-P, de forma contrária ao comportamento apresentado na relação a/c 0,55, foi o que teve o menor abatimento durante todo o ensaio, o que pode ser explicado por este ter sido o único dessa relação a/c a não empregar aditivo superplastificante. Já concreto com AGN, até os 75 minutos de ensaio, foi o que apresentou os maiores valores de consistência.

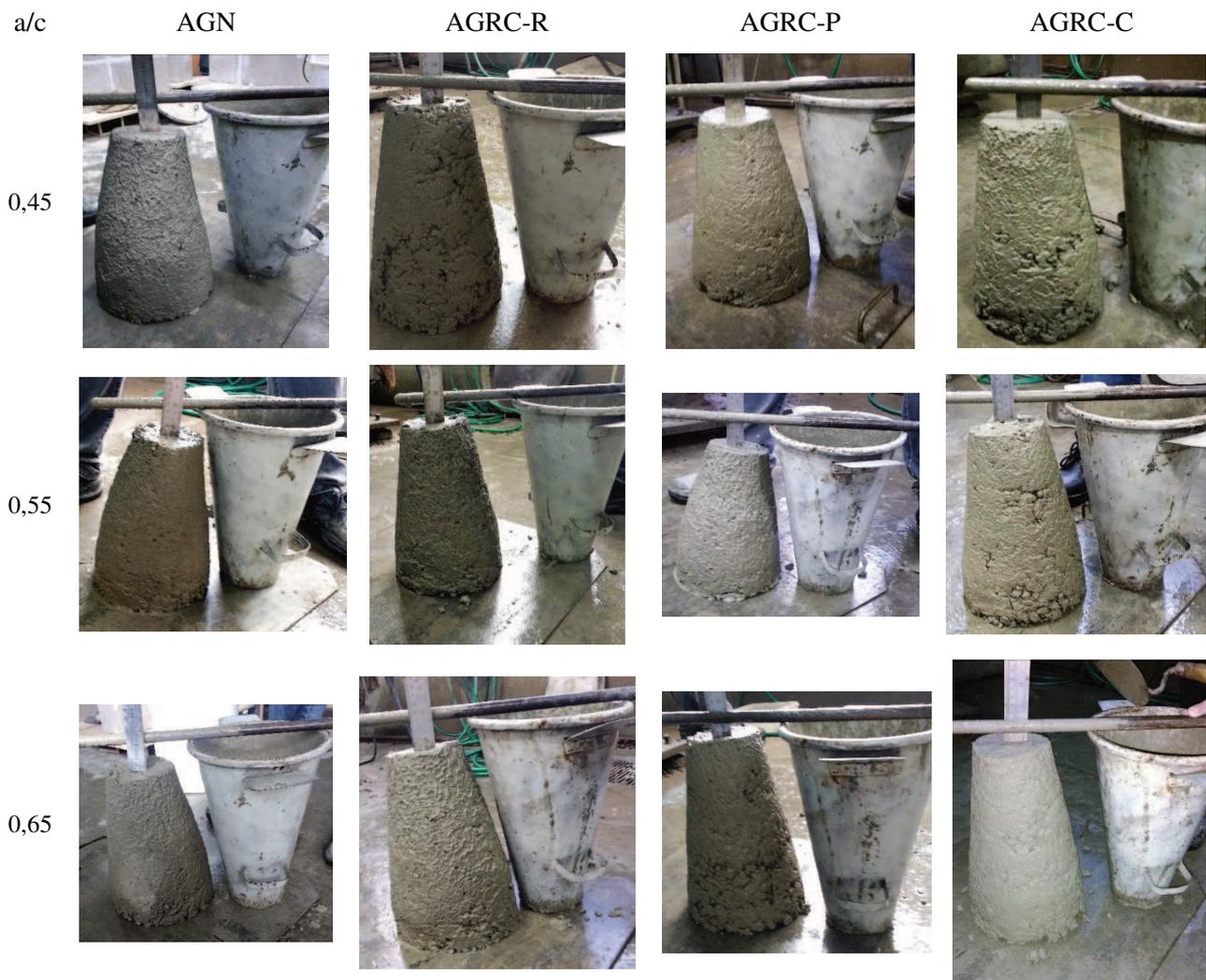
Verifica-se, ainda, que é possível que as primeiras consistências medidas não reflitam a real absorção de água dos agregados. Isso porque na primeira leitura de abatimento ocorreu dois minutos após a colocação do agregado na mistura e, após dois minutos de ensaio de absorção de água dos agregados, visto na Figura 43, os valores apresentados pelos agregados reciclados já estavam próximos a 1,5% e 2%.

Apesar do cuidado que foi tomado para evitar a perda de água da mistura e, com isso, a perda de abatimento, verificou-se que todos os traços apresentaram perda de consistência média de aproximadamente 70% na primeira hora de ensaio. Percebeu-se que, ao longo dos ensaios, há grande perda de argamassa em cada leitura devido à aderência desta às ferramentas e aparelhos utilizados, o que acaba reduzindo o percentual de argamassa da mistura, conferindo uma consistência mais seca. Verificou-se, ainda, que perda de argamassa para as ferramentas ocorreu conforme o teor desta na mistura, ou seja, nas primeiras leituras

houve maior perda e, ao longo do tempo, esta foi diminuindo pelo fato de haver menor disponibilidade.

Isso, conseqüentemente, teve reflexo nas leituras durante o ensaio, onde a principal redução de abatimento ocorre nas primeiras leituras do ensaio, pois o abatimento médio apresentado pelos concretos aos 30 minutos corresponde a 57% (68 mm) da medida inicial (117,5 mm) e, aos 60 minutos esse valor foi reduzido para 30,4% (36 mm). Dessa forma, as leituras de abatimento obtidas na segunda hora de ensaio exibiram consistência seca. Além disso, percebeu-se que estas sofriam grande influência do operador, pois a velocidade na aplicação dos golpes em cada camada e a altura de enchimento das camadas, por exemplo, foram fatores que alteravam as medidas obtidas. A Figura 53 apresenta a aparência dos concretos com os quatro tipos de agregados graúdos empregados aos 60 minutos de ensaio.

Figura 53 – Aparência dos concretos aos 60 minutos no ensaio de perda de abatimento



Fonte: Elaborada pela autora

Percebe-se que, aos 60 minutos de ensaio, os concretos ainda apresentavam acabamento relativamente liso, porém não apresentavam mais a fluidez inicial. Isso porque já havia ocorrido perda de água para o agregado e também perda de argamassa para as ferramentas utilizadas nas leituras. Ou seja, nesse momento não havia mais os 55% de argamassa definidos inicialmente e nem a relação a/c era correspondente à inicial.

Para verificar as influências do tratamento dos agregados sobre o abatimento, foi realizada análise estatística. Apresentada na Tabela 19, a análise possui as mesmas variáveis consideradas para a resistividade no estado fresco: “AGRC”, “a/c” e “Tempo”.

Tabela 19 – Análise de variância (ANOVA) para o abatimento ao longo do tempo dos concretos

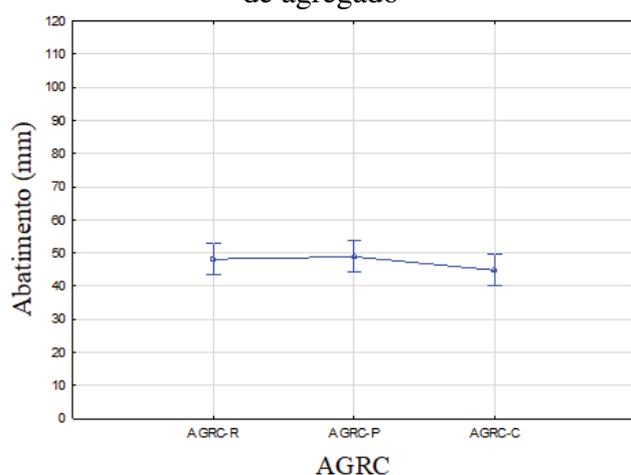
Efeito	SQ	GL	MQ	F	P
Intercessão	181097,5	1	181097,5	1177,738	0,000000
AGRC	254,3	2	127,2	0,827	0,441724
a/c	7078,4	2	3539,2	23,017	0,000000
Tempo	101713,6	8	12714,2	82,685	0,000000
Error	10456,2	68	153,8		

Onde: SQ = soma quadrada; gl = grau de liberdade; MQ = média quadrada; F= razão entre modelo e erro; P = nível de probabilidade; Preto= não significativo; Vermelho = significativo

Fonte: Elaborada pela autora

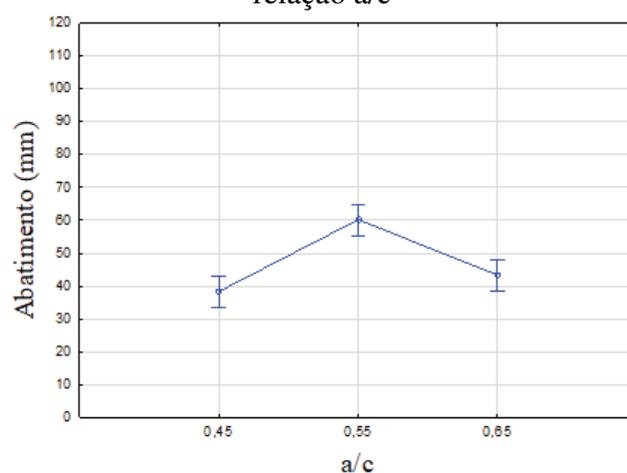
Percebe-se que, nesse caso, o tipo de agregado graúdo utilizado não teve influência significativa, o que se verifica na similaridade de comportamento dos concretos nesse ensaio e no gráfico da Figura 54, onde a curva fica próxima à linha dos 50 mm. A relação a/c apresentou influência significativa e pode-se verificar na Figura 55.

Figura 54 – Médias de abatimento para cada tipo de agregado



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 55 – Médias dos abatimentos para cada relação a/c



Fonte: Elaborada pela autora

Conforme mostra a Figura 54, as médias das leituras de abatimento de cada tipo de agregado empregado na pesquisa foram similares. Analisando-se os tratamentos empregados nos agregados reciclados, verifica-se que, quando comparados aos concretos com AGRC-R, os concretos com AGRC-P tiveram abatimentos médios 1,5% maiores e os concretos com AGRC-C apresentaram abatimentos em média 6,94% menores.

Conforme visto na Figura 55 e indicado na Tabela 19, a relação a/c apresentou influência significativa na perda de abatimento ao longo do tempo. Isso porque os concretos de relação a/c 0,45 apresentam abatimento médio 28% inferior em relação aos concretos com a/c 0,55. A redução de abatimento médio dos concretos de relação a/c 0,55 para 0,65 foi de 19%. É possível que a redução no abatimento médio apresentada pelos concretos de relação

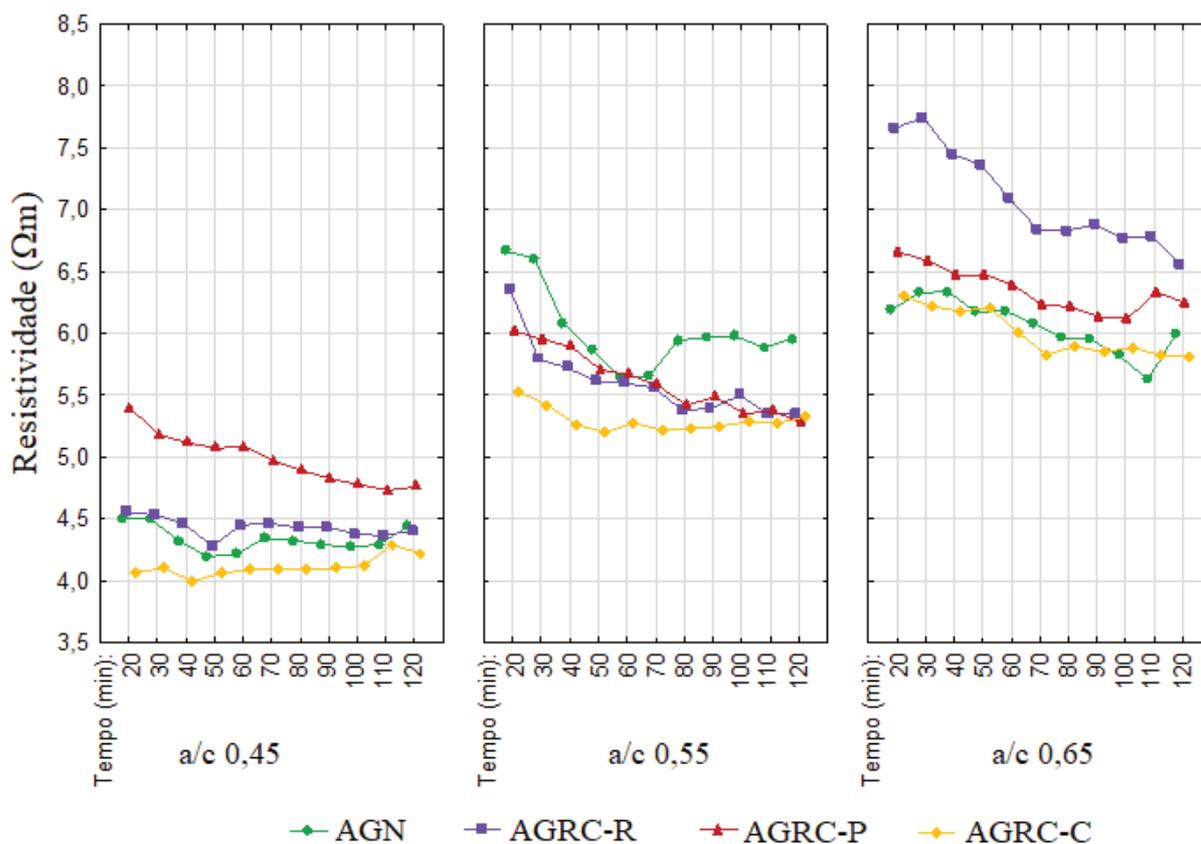
a/c 0,65 tenha sido ocasionada pela menor utilização de aditivo superplastificante, tendo uma menor manutenção no abatimento. Outro fator que levou os concretos de relação a/c 0,65 a terem reduzido seu abatimento médio é o fato de que, com menor concentração de partículas de cimento e, com isso, menor viscosidade da água, ocorre maior facilidade de absorção da água de abatimento pelos agregados reciclados.

Por fim, pode-se dizer que o abatimento apresentou valores médios inferiores para os concretos contendo agregados reciclados na faixa de 7% a 15%, sendo que o concreto com AGRC-C obteve as menores consistências médias.

4.2.2. Resistividade elétrica dos concretos no estado fresco

A resistividade elétrica dos concretos no estado fresco durante os 120 minutos de ensaio é apresentada na Figura 56.

Figura 56 – Resistividade elétrica no estado fresco dos concretos estudados



Fonte: Elaborada pela autora

Percebe-se, pela Figura 56, que os concretos de relação a/c 0,45 exibiram maior uniformidade ao longo do tempo, sendo que o concreto com o AGRC-P apresentou redução

percentual de 11% da primeira para última leitura. O concreto contendo agregado reciclado de referência foi o que apresentou os valores mais próximos ao concreto de agregado natural e o concreto contendo agregados reciclados carbonatados foi o que apresentou menores valores de resistividade no estado fresco. Os concretos com a/c 0,55 tiveram redução de aproximadamente 1 Ωm entre o início e o fim do ensaio, com exceção dos concretos com AGRC-C que manteve valores próximos à média de 5,30 Ωm . Destaca-se que essa alteração foi apresentada também nos concretos contendo apenas agregados naturais e que todos levaram aditivo estabilizador de hidratação em sua composição. Os concretos com relação a/c 0,65 apresentaram leve redução nos valores de resistividade no estado fresco, com exceção do concreto com AGRC-R, que exibiu uma queda de 25% nos valores. Este último possui, ainda, a maior resistividade durante todo o período do ensaio.

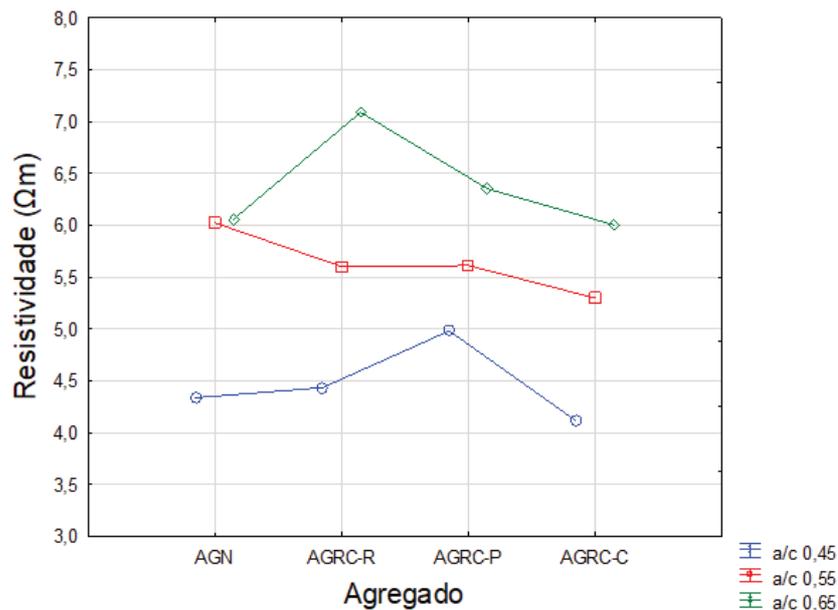
As médias das resistividades podem ser vistas na Tabela 20 e na Figura 57.

Tabela 20 – Média das resistividades elétricas no estado fresco de cada relação a/c dos concretos

Relação a/c	Resistividade elétrica média (Ωm)			
	AGN	AGRC-R	AGRC-P	AGRC-C
0,45	4,34	4,43	4,98	4,11
0,55	6,02	5,60	5,61	5,30
0,65	6,05	7,09	6,35	6,00

Fonte: Elaborada pela autora

Figura 57 – Médias de resistividades dos concretos no estado fresco



Fonte: Elaborada pela autora

Os concretos contendo agregados reciclados carbonatados apresentaram os menores valores de resistividade elétrica no estado fresco para todas as relações a/c , conforme visto na Tabela 20 e na Figura 57. Já os concretos com agregados reciclados sem tratamento, pelo contrário, apresentaram as maiores resistividades, com exceção da relação a/c 0,45, onde o concreto AGRC-P obteve resultados mais altos.

É possível que, para a relação a/c 0,45, os MCV depositados na superfície do AGRC-P tenha se soltado na mistura, causando a elevação da resistividade elétrica, efeito que ocorre em concretos que empregam cimentos contendo adições minerais. (MANCIO et al., 2010). A maior resistividade elétrica apresentada pelo AGRC-R é devida provavelmente à sua maior absorção de água em relação aos demais agregados. Ao absorver a água durante a mistura do concreto, o ar aprisionado nos poros do agregado é liberado, gerando pequenas bolhas de ar que têm dificuldade em sair devido à maior viscosidade da solução.

Na relação a/c 0,55 percebe-se um processo de transição, onde o AGRC-R começa a absorver mais água pela menor viscosidade da mistura, gerando maior quantidade de bolhas que dificultam a passagem da corrente elétrica pela amostra. A diminuição da resistividade pode ser devida ao processo de expulsão dessas bolhas ocasionado pela mistura feita para homogeneização da amostra durante o ensaio. Nessa relação a/c , a pozolana liberada pelo AGRC-P passa a não influenciar de forma tão significativa quanto as bolhas liberadas pelo AGRC-R.

Figura 58 – Concreto com AGRC após mistura onde foram identificadas bolhas de ar



Fonte: Elaborada pela autora

Por fim, na relação a/c 0,65 passa a ocorrer o efeito “aerador” nos concretos contendo AGRC-R de forma mais acentuada, elevando sua resistividade média para 1 Ω m a mais quando comparado aos demais concretos. Nessa situação a redução na absorção de água dos agregados reciclados causada pela carbonatação e pela imersão em solução de pozolana se torna mais visível e acentuada.

Os concretos contendo AGRC-C apresentaram as menores resistividades em todas as relações a/c. Esse efeito possivelmente é devido ao fato de que este agregado reciclado é o que apresenta a menor absorção de água até o período de duas horas, conforme apresentado no item anterior (4.1.3). Dessa forma, o agregado não libera bolhas de ar como o AGRC-R, nem adições minerais como o AGRC-P, e também não altera a relação a/c da mistura ao longo do ensaio, não apresentando alterações na curva.

Buscando-se analisar a influência do tratamento dos agregados reciclados sobre os resultados de resistividade elétrica no estado fresco dos concretos, foi realizada a análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 21. Nesta, são apresentados os efeitos isolados dos fatores de controle “tratamento do agregado reciclado” (AGRC), “relação água/cimento” (a/c) e “tempo de ensaio” (Tempo) sobre a resistividade elétrica dos concretos contendo agregados reciclados.

Tabela 21 – Análise de variância (ANOVA) para a resistividade elétrica no estado fresco de concretos com AGRC

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p
Intercessão	2992,318	1	2992,318	35354,26	0,000000
AGRC	6,479	2	3,239	38,27	0,000000
a/c	64,079	2	32,040	378,55	0,000000
Tempo	2,581	10	0,258	3,05	0,002415
Error	7,110	84	0,085		

Onde: SQ = soma quadrada; gl = grau de liberdade; MQ = média quadrada; F= razão entre modelo e erro; P = nível de probabilidade; Preto= não significativo; Vermelho = significativo

Fonte: Elaborada pela autora

Conforme apresenta a Tabela 21, percebe-se que todos os fatores empregados na pesquisa apresentaram efeito significativo sobre a resistividade elétrica no estado fresco. Dessa forma, percebe-se que o tratamento empregado para a melhoria dos agregados reciclados apresentou efeito no estado fresco dos concretos. Além disso, as variações vistas ao longo do tempo de ensaio tiveram influência significativa, bem como a relação a/c, que já era esperada conforme visto na bibliografia apresentada.

Pode-se concluir que o ensaio de resistividade elétrica no estado fresco refletiu bem a absorção de água dos agregados, apresentando tendência similar ao estudado na bibliografia,

onde a presença de pozolanas e o maior teor de sólidos tende a aumentar os valores. Além disso, os resultados desse ensaio refletiram o comportamento dos agregados visto no ensaio de absorção de água, onde o AGRC-C tem uma absorção reduzida nas primeiras duas horas.

4.2.3. Absorção de água por capilaridade

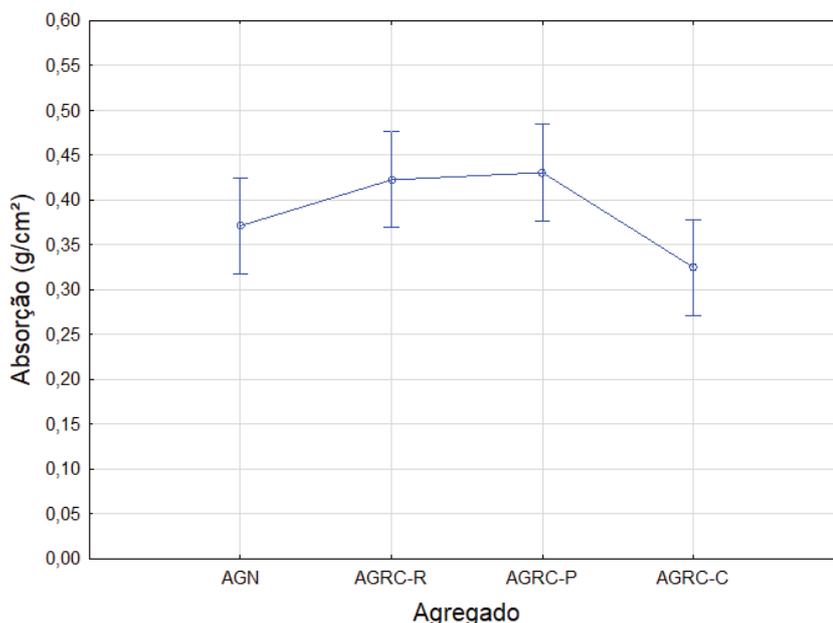
A taxa de absorção, a porosidade efetiva e a absorção capilar final determinadas através do ensaio de absorção de água por capilaridade são apresentadas na Tabela 22 e na Figura 59 é apresentada a absorção capilar média de água dos concretos executados com cada tipo de agregado.

Tabela 22 – Taxa de absorção capilar, porosidade efetiva e absorção final capilar para os concretos executados

AGRC	a/c	S (g/cm ² ·√min)	P efetiva (%)	Absorção (g/cm ²)
AGN	0,45	0,106	11,909	0,373
AGN	0,55	0,094	12,019	0,351
AGN	0,65	0,118	12,816	0,391
AGRC-R	0,45	0,116	13,164	0,413
AGRC-R	0,55	0,139	12,927	0,444
AGRC-R	0,65	0,106	12,163	0,411
AGRC-P	0,45	0,097	13,164	0,368
AGRC-P	0,55	0,148	14,518	0,463
AGRC-P	0,65	0,133	13,520	0,461
AGRC-C	0,45	0,059	7,324	0,258
AGRC-C	0,55	0,138	12,805	0,391
AGRC-C	0,65	0,084	10,413	0,326

Fonte: Elaborada pela autora

Figura 59 – Médias da absorção capilar de água para de cada tipo de agregado graúdo



Fonte: Elaborada pela autora

Os resultados de taxa de absorção (S), porosidade efetiva (P) e absorção capilar apresentam a mesma tendência que é apresentada na Figura 59. Verifica-se que o tratamento pozolânico resultou em aumento de 1,93% na absorção capilar dos concretos estudados quando comparados ao AGRC de referência, já a carbonatação dos agregados resultou em concretos que absorveram, em média, 23,1% menos em relação AGRC-R. Estes últimos apresentaram absorção média inferior até mesmo aos concretos executados com agregado natural, com valores médios 12,5% menores. Quando comparados os concretos com AGN e AGRC-R, percebe-se que a presença do resíduo aumenta 13,8% os resultados.

Conforme comentado para a resistividade elétrica (4.2.1), é provável que os MCV presentes na superfície do AGRC-P tenham se desprendido e incorporado à mistura do concreto e gerado uma reação pozolânica. Dessa forma, é provável que houve um refinamento dos poros e que tenha permanecido uma interconexão entre eles. Isso resultou no aumento da absorção capilar do concreto no estado endurecido. Esse efeito também foi percebido por Pacheco-Torgal e Jalali (2010) ao executar concretos com MCV e também por Fedumentini (2013) e Sartori et al. (2017) ao utilizar cinza de casca de arroz como pozolana. Em seus trabalhos, os autores justificam o aumento da absorção capilar dos concretos executados com pozolanas com a possibilidade de que a pozolana utilizada tenha reduzido o tamanho dos poros maiores para poros capilares, acarretando em aumento na taxa de absorção capilar de água.

Para os concretos contendo agregados reciclados carbonatados nota-se, pela Tabela 22, que a maior redução na absorção capilar ocorreu nas relações a/c 0,45 e 0,55. Entende-se que, além da redução na porosidade do próprio agregado reciclado já verificada, a absorção de água da mistura gerada por este acarretou em redução da porosidade da argamassa, podendo até mesmo ter reduzido a conexão entre os poros resultantes.

Na Tabela 23, é possível verificar a influência dos tipos de agregados e da relação a/c na absorção capilar final dos concretos.

Tabela 23 – Análise de variância (ANOVA) para a absorção capilar dos concretos

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P
Intercessão	1,388576	1	1,388576	1372,355	0,000003
AGRC	0,020796	2	0,010398	10,276	0,026541
a/c	0,011416	2	0,005708	5,641	0,068502
Erro	0,004047	4	0,001012		

Onde: SQ = soma quadrada; gl = grau de liberdade; MQ = média quadrada; F= razão entre modelo e erro; P = nível de probabilidade; Preto= não significativo; Vermelho = significativo

Fonte: Elaborada pela autora

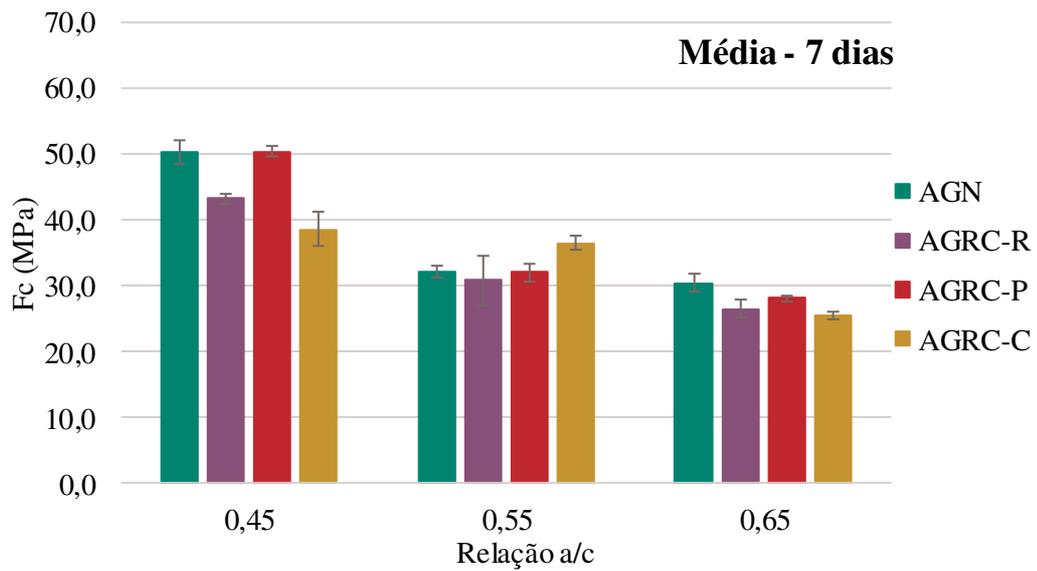
Percebe-se que as alterações ocasionadas pelo tratamento dos agregados reciclados apresentaram influência significativa na absorção capilar dos concretos e que o mesmo não aconteceu para a relação a/c. De fato, analisando-se na Tabela 22 as alterações nos resultados para as relações a/c de cada tipo de agregado, não se percebe uma evolução direta com o aumento da relação a/c. Nota-se apenas variações que não apresentam uma tendência. Essas variações, no entanto, levam o valor P da relação a/c a chegar próximo da significância.

Dessa forma, a absorção capilar dos concretos também refletiu o efeito do tratamento dos agregados reciclados, onde a reação pozolânica possivelmente colmatou os poros do AGRC-P e do entorno deste, resultando em maior quantidade de poros capilares que aumentam os valores desse ensaio. A carbonatação, por outro lado, absorveu água da mistura, reduzindo a porosidade no seu entorno e, combinando com a redução na porosidade do próprio AGRC-C, reduziu a absorção capilar a valores inferiores aos do concreto com AGN. Já no concreto com AGRC-R, o efeito de possivelmente ter reduzido a porosidade da nova matriz cimentícia devido à absorção de água não foi suficiente para equilibrar sua própria porosidade, fazendo com que os valores de absorção capilar de água dos concretos fosse, em média 14% maiores.

4.2.4. Resistência à compressão

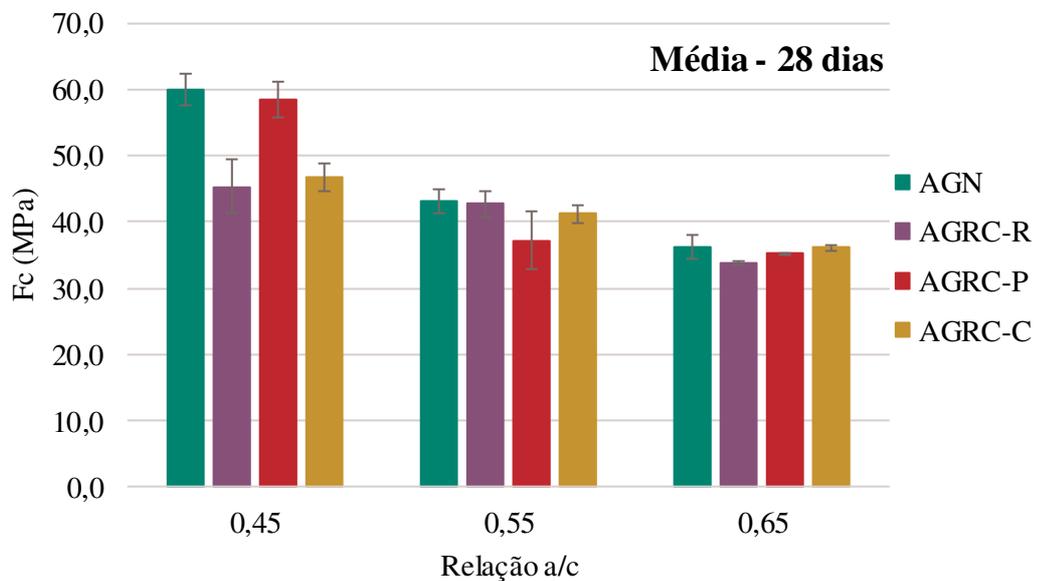
As resistências médias à compressão dos concretos estudados são apresentadas na Figura 60 para a idade de 7 dias e na Figura 61 para 28 dias. A resistência média dos resultados de resistência à compressão é empregada devido à variabilidade causada pelos agregados reciclados utilizados.

Figura 60 – Resistência a compressão média dos concretos aos 7 dias



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 61 – Resistência a compressão média dos concretos aos 28 dias



Fonte: Elaborada pela autora

Para ambas as idades, os concretos com relação a/c 0,45 apresentaram as maiores resistências à compressão e os com relação a/c 0,65 tiveram as menores resistências. Analisando-se o comportamento dos concretos em cada relação a/c, percebe-se que há tendência dos concretos com AGN apresentarem os maiores valores e os concretos com AGRC-R os menores. Entretanto, para a relação a/c 0,55 há uma variação dessa tendência tanto aos 7 quanto aos 28 dias. Nesta relação a/c, os concretos com AGRC-R apresentaram valores superiores aos com AGN, sendo que aos 7 dias este último apresenta o menor valor e, aos 28 dias, o concreto com AGRC-P é o que apresenta o menor valor.

A porosidade da matriz cimentícia e a zona de transição entre argamassa, segundo Mehta e Monteiro (2015), são áreas de maior influência sobre a resistência à compressão axial dos concretos. Neste trabalho, foi verificada uma tendência de fortalecimento da nova matriz cimentícia. É provável que esse fortalecimento tenha ocorrido de forma mais acentuada nas relações a/c 0,55 e 0,65, onde os AGRCs possuem mais água disponível para absorver e, dessa forma, acarretam em possíveis reduções na relação a/c. Por outro lado, a partir da liberação do ar aprisionado nos agregados reciclados, como comentado no item 2.2.1, há aumento da porosidade da matriz cimentícia.

Já para os concretos com relação a/c 0,45, é possível que, com a menor quantidade de água disponível para ser absorvida, esse comportamento não tenha ocorrido de forma tão acentuada e a matriz cimentícia de todos os traços tenha apresentado a mesma porosidade. Dessa forma, a fissuração gerada durante o rompimento dos corpos de prova possivelmente passou a introduzir-se no próprio agregado e, nesse caso, o rompimento foi supostamente determinado pela resistência do agregado gráudo. A partir do tratamento com MCV, é possível que microfissuras e zona de transição antiga tenham sido fortalecidas com a reação pozolânica e, dessa forma, o concreto com AGRC alcançou resistências mais próximas ao concreto com AGN e 29% maiores que o concreto com AGRC-R. Esse efeito foi verificado por Tam e Tam (2008), onde os autores comprovaram por MEV o fortalecimento da antiga ZT a partir da presença de pozolana no AGRC. Para o AGRC-C, apesar das melhorias na absorção de água e massa específica, provavelmente a zona de transição antiga continuou sendo uma região frágil, fazendo com que a resistência do concreto que o empregou seja 3% superior à do concreto com AGRC-R.

Para verificar se as diferenças identificadas são significativas, foi realizada a análise de variância apresentada na Tabela 24, onde foram aplicados os fatores “tratamento” (AGRC), “relação a/c” (a/c) e “idade”, bem como a interação entre eles, sobre a variável “resistência à compressão”.

Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA) para a resistência à compressão dos concretos

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P
Intercessão	79015,89	1	79015,89	17777,73	0,000000
Idade	714,02	1	714,02	160,65	0,000000
AGRC	109,20	2	54,60	12,28	0,000086
a/c	2450,01	2	1225,01	275,61	0,000000
Idade*AGRC	2,35	2	1,17	0,26	0,769389
Idade*a/c	11,09	2	5,55	1,25	0,299255
AGRC*a/c	442,24	4	110,56	24,87	0,000000
Idade*AGRC*a/c	94,43	4	23,61	5,31	0,001818
Erro	160,01	36	4,44		

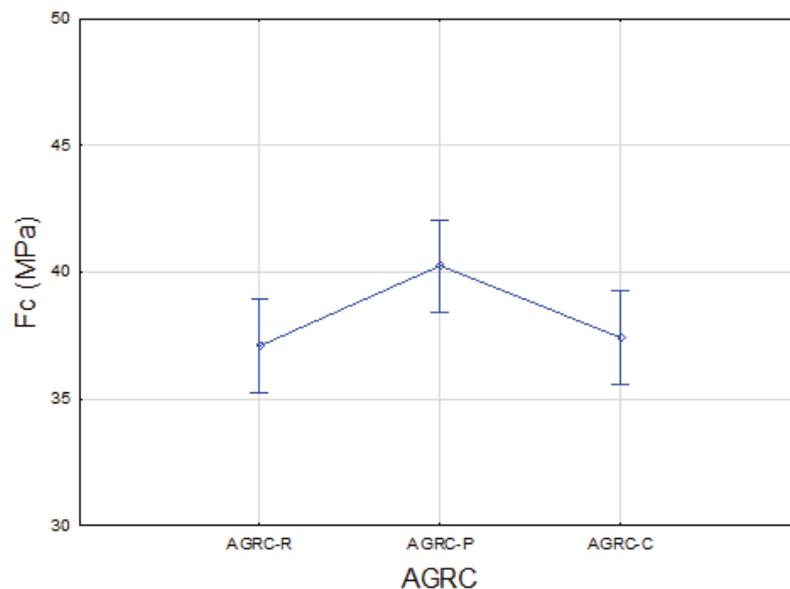
Onde: SQ = soma quadrada; gl = grau de liberdade; MQ = média quadrada; F= razão entre modelo e erro; P = nível de probabilidade; Preto= não significativo; Vermelho = significativo

Fonte: Elaborada pela autora

Percebe-se que, quando analisados apenas os efeitos do tratamento no AGRC sobre a resistência à compressão dos concretos, todos os fatores influenciaram significativamente nos resultados. A evolução média da resistência à compressão dos 7 para os 28 dias de ensaio é de 20%. A redução na relação a/c de 0,65 para 0,55 gerou aumento médio na resistência à compressão de 19% e, na redução de 0,55 para 0,45, esse aumento foi de 28%

Apesar do tratamento do AGRC ter apresentado efeito significativo, verifica-se pelo gráfico da Figura 62 que as médias das resistências mecânicas apresentaram valores entre 37 MPa e 40 MPa.

Figura 62 – Médias da Resistência à compressão para de cada tipo de agregado



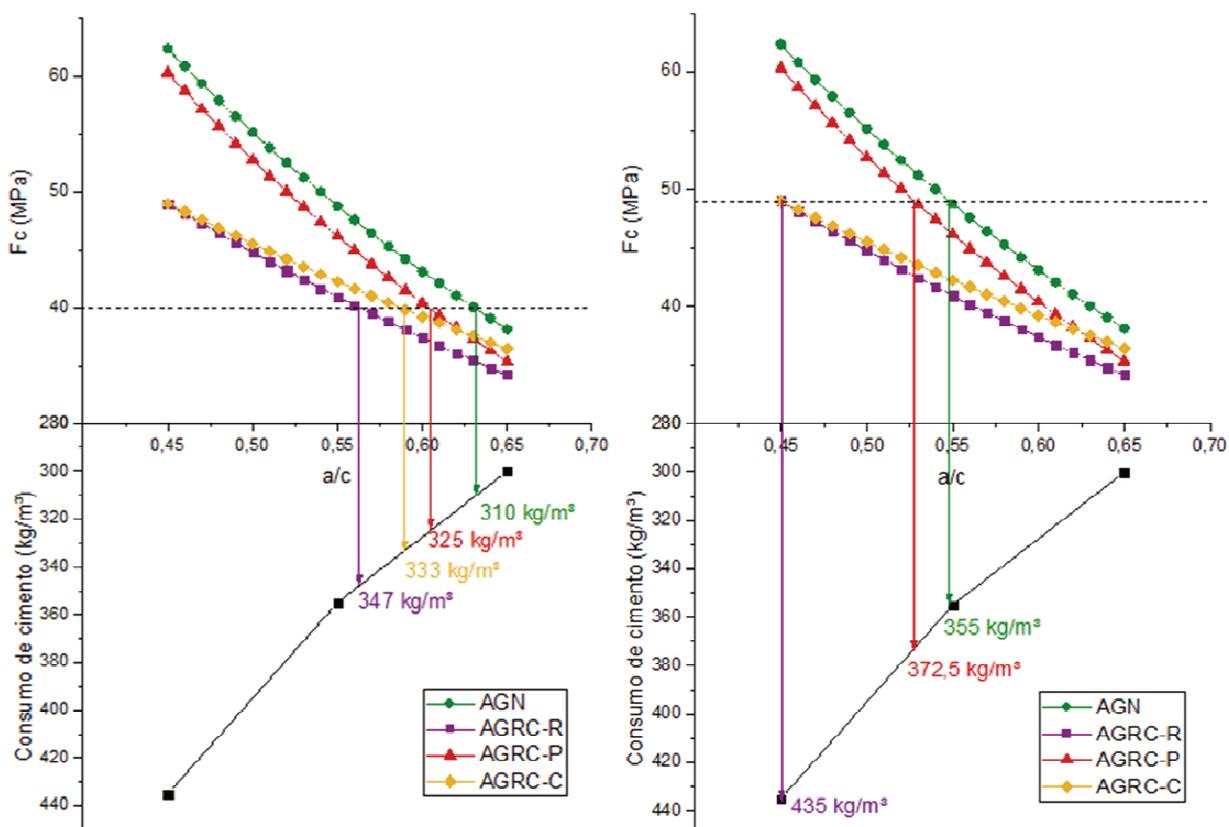
Fonte: Elaborada pela autora

Através das médias de resistência à compressão nota-se que os concretos contendo AGRC-R apresentaram as menores médias de resistência à compressão (37,08 MPa), seguidas dos concretos com AGRC-C (37,42 MPa), enquanto que o tratamento com microfinos de cerâmica vermelha gerou os concretos com maiores resistências à compressão (40,25 MPa). Entretanto, a diferença entre eles é inferior a 9%

Os valores médios se apresentaram similares devido ao fato de que, para as relações a/c 0,55 e 0,65, os concretos com AGRC-R e AGRC-C apresentaram as maiores resistências, já na relação a/c 0,45, os concretos com AGN e AGRC-P passar a exibir os maiores valores.

Na Figura 63 é apresentado gráfico onde o primeiro quadrante refere-se à curva de Abrams de cada concreto estudado, e o segundo apresenta o consumo de cimento que foi mantido para todos os traços. Na figura foi destacada uma linha horizontal tracejada a partir do eixo da resistência na altura dos 40 MPa e, nos pontos em que esta corta as curvas dos concretos, foram inseridas setas na direção da curva de consumo com o objetivo de analisar a quantidade de cimento necessária para o alcance de resistência de cada traço.

Figura 63 – Relação entre a curva de Abrams e o consumo de cimento dos concretos estudados



Fonte: Elaborada pela autora

As eficiências no consumo de cimento dos concretos foram de 7,75 kg/m³, 8,125 kg/m³, 8,325 kg/m³ e 8,675 kg/m³ para os concretos com AGN, AGRC-P, AGRC-C e AGRC-R, respectivamente. Com isso, o consumo de cimento para alcançar a resistência de MPa foi 12% maior para o concreto com AGRC-R quando comparado ao concreto com AGN. O tratamento dos agregados reciclados com impregnação de MCV gerou uma redução de 7% no consumo em relação ao AGRC-R e, com a carbonatação, essa redução foi de 2,4%.

Observa-se, também, que há uma tendência de aumento diferença da eficiência relacionado à redução da relação a/c. Ou seja, quando analisada a resistência de 50 MPa, verifica-se um consumo de cimento 60 kg menor para os concretos com AGN e AGRC-P quando comparados aos concretos com AGRC-R e AGRC-C, o que representa uma redução 14%. Por outro lado, em relações a/c maiores e resistências menores, há tendência de que os consumos de cimento apresentem valores mais próximos.

Assim, pode-se dizer que o tratamento dos agregados reciclados apresentou influência significativa para o ensaio de resistência à compressão, e isso possivelmente seria potencializado caso a substituição de agregado graúdo fosse superior a 25%. Os concretos com AGRCs apresentaram valores inferiores, porém as diferenças médias em relação ao concreto AGN são de 10% no máximo.

4.3. Ecoeficiência quanto às emissões dos concretos estudados

As quantificações do CO₂ que deixou de ser emitido ao ambiente a partir do emprego de agregados graúdos reciclados, bem como das emissões relativas ao cimento e ao agregado graúdo por unidade de resistência dos concretos, são realizadas neste trabalho a partir de dados presentes na bibliografia. Já a quantificação do sequestro de CO₂ do ambiente devido à carbonatação do agregado reciclado foi realizada por análise química conforme descrito no item 3.4.6.

Segundo Cunha (2016), o emprego de agregados naturais em obras no Brasil gera em torno de 17,46 kg de CO₂ a cada metro cúbico produzido, sendo que 0,68 kg de CO₂/m³ são relativos à eletricidade empregada para o processamento da matéria prima. McGinnis et al. (2017) afirmam que a utilização de agregados reciclados reduz em 40% as emissões de CO₂. Dessa forma, a cada metro cúbico de agregado reciclado utilizado, há geração de 10,48 kg de CO₂. Esse valor é adotado, nesta pesquisa, para os agregados reciclados de referência e para os agregados reciclados tratados com pozolana.

Para o agregado reciclado carbonatado, pode ser reduzido ainda a quantia de CO₂ que este capturou do ambiente através da carbonatação. Durante o ensaio descrito em 3.4.6, foram gerados 57 ml de CO₂ a partir de 3,667 g de AGRC-C. Isso significa a geração de 0,00254 mol de CO₂ no agregado. Sendo a massa molar do CO₂ = 44 g, o CO₂ gerado possui 0,11 g, o que representa aproximadamente 3% da massa do AGRC-C.

Vale lembrar que, no experimento para a determinação do CO₂ na amostra, foram utilizados agregados cuja composição era apenas da fração argamassa do AGRC. Dessa forma, deve ser considerado que o teor de argamassa representa 44% do agregado reciclado e os 3% de CO₂ se dão apenas sobre a fração argamassa. Ou seja, dos 2.570 kg de cada metro cúbico de AGRC-C, 1138 kg representam a fração argamassa e 34 kg representam o CO₂ capturado. Assim, o sequestro de dióxido de carbono devido à carbonatação do AGRC ultrapassa as emissões geradas pelo processamento do mesmo.

A partir disso, foi realizado cálculo relacionando a resistência do concreto com as emissões geradas pelo agregado graúdo. A geração de gás carbônico dos agregados graúdos para cada concreto empregado nesta pesquisa é apresentada na Tabela 25.

Tabela 25 – Cálculo das emissões e sequestro de CO₂ por m³ de agregado graúdo empregado

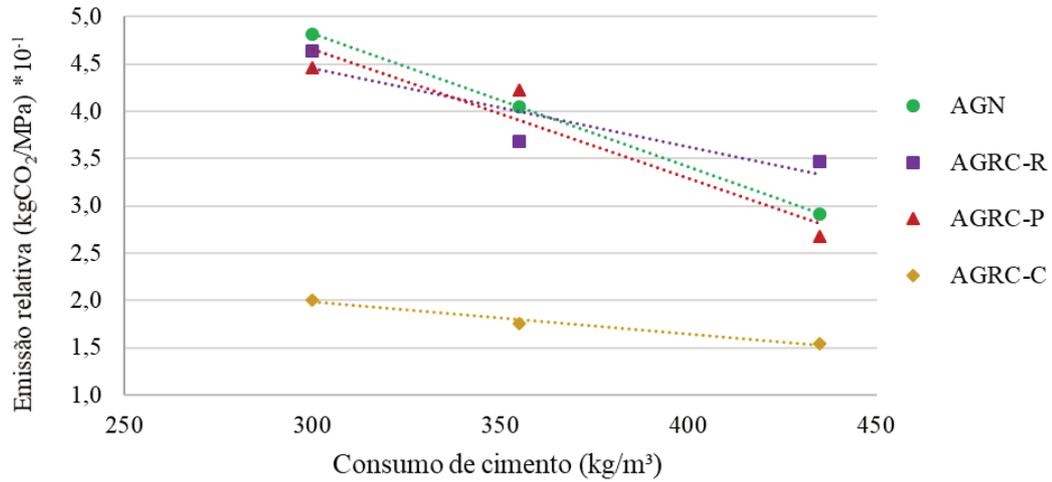
Agregado	Massa de CO ₂ gerado (kg)			Total CO ₂ gerado (kg)	Relação a/c	Fc (MPa)	Emissão relativa (kgCO ₂ /MPa) *10 ⁻¹
	AGN	AGRC	Carbonatação				
AGN	17,46			17,46	0,45	59,97	2,91
					0,55	43,11	4,05
					0,65	36,24	4,82
AGRC-R	13,095	2,62		15,71	0,45	45,36	3,46
					0,55	42,74	3,68
					0,65	33,89	4,64
AGRC-P	13,095	2,62		15,71	0,45	58,61	2,68
					0,55	37,16	4,23
					0,65	35,24	4,46
AGRC-C	13,095	2,62	-8,48	7,23	0,45	46,76	1,55
					0,55	41,17	1,76
					0,65	36,07	2,01

Fonte: Elaborada pela autora

A partir da substituição de 25% de AGN por AGRC, verificou-se que há uma redução de 10% nas emissões de CO₂ a cada metro cúbico de agregado consumido. Quando o AGRC passa por processo de carbonatação essa diferença aumenta para 59%, pois o sequestro de CO₂ passa a compensar as emissões geradas no consumo. Quando ocorrem maiores teores de substituição de agregado graúdo essa diferença passa a ser ainda maior. Apesar dessa

melhoria, é importante comparar tais emissões com o desempenho mecânico dos concretos estudados, o que é apresentado na última coluna da Tabela 25 Na Figura 64 esse comportamento é ilustrado e apresentado para cada traço estudado.

Figura 64 – Emissão de CO₂ relativa aos agregados graúdos (m³) por unidade de resistência dos concretos estudados



Fonte: Elaborada pela autora

Há uma tendência similar para os concretos com AGN, AGRC-R e AGRC-P na ecoeficiência da geração de CO₂ quando relacionada à resistência à compressão. Entre estes três concretos, em geral, quanto maior o consumo de cimento, menores são as emissões de CO₂ para cada MPa alcançado. Analisando-se os valores desses três concretos, verifica-se que as emissões são, em média, 0,39 kgCO₂/MPa.

O concreto contendo AGRC-C, nessa análise, se destaca por ser 46% mais ecoeficiente quando comparado aos demais concretos. Sua ecoeficiência média é de 0,18 kgCO₂/MPa e este apresenta a tendência de redução nas emissões relativas quando ocorre aumento do consumo de cimento, de forma similar aos demais estudados. Esse resultado é alcançado devido ao sequestro de CO₂ por meio da carbonatação que reduz no ambiente, em média, 13 gramas de CO₂ a cada quilo de AGRC consumido. Enquanto isso, cada quilo de AGN emite ao ambiente 6,5 gramas de CO₂ e cada quilo de AGRC não carbonatado emite 4,1 gramas de CO₂.

Para verificar o balanceamento de emissões do cimento gerado pela utilização de AGRCs no concreto, e também pela carbonatação desse agregado, foi realizado cálculo das emissões de CO₂ para cada MPa alcançado pelos concretos. Neste, foram somadas as emissões do cimento e do agregado graúdo empregado. Os resultados são apresentados na

Tabela 26 e plotados no gráfico da Figura 65. Para o cálculo das emissões do cimento, foi considerado o apresentado por Lima (2010), que afirma uma emissão média de 659 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzida.

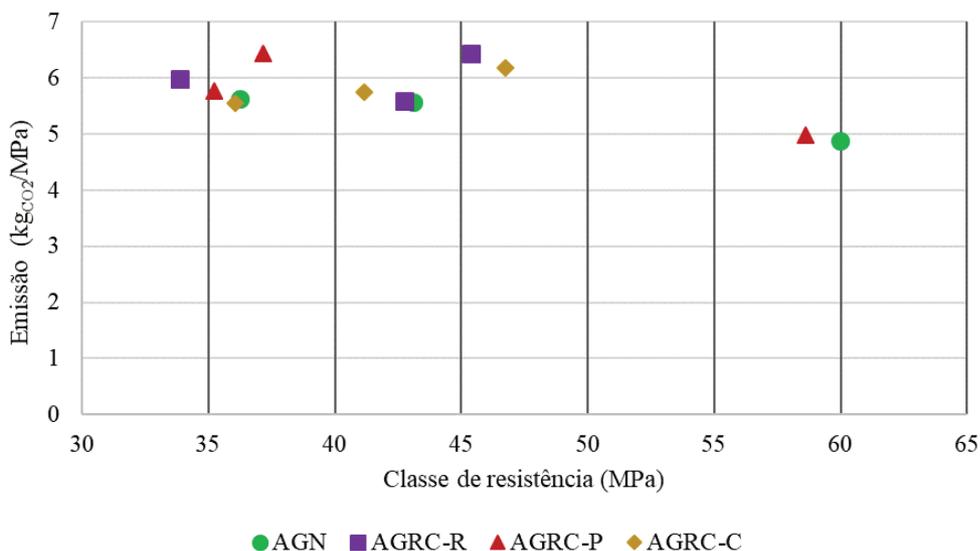
Tabela 26 – Cálculo das emissões e sequestro de CO₂ por m³ de agregado graúdo empregado

Agregado	Relação a/c	Consumo de cimento	Eficiência (kgCIM/MPa)	Emissões por m ³ de concreto		
				Agregado graúdo	Cimento	Total
AGN	0,45	435	7,25	0,11	4,78	4,89
	0,55	355	8,24	0,15	5,43	5,58
	0,65	300	8,28	0,18	5,46	5,63
AGRC-R	0,45	435	9,59	0,12	6,32	6,44
	0,55	355	8,31	0,13	5,47	5,60
	0,65	300	8,85	0,16	5,83	5,99
AGRC-P	0,45	435	7,42	0,09	4,89	4,98
	0,55	355	9,55	0,15	6,30	6,44
	0,65	300	8,51	0,15	5,61	5,76
AGRC-C	0,45	435	9,30	0,05	6,13	6,18
	0,55	355	8,62	0,06	5,68	5,74
	0,65	300	8,32	0,07	5,48	5,55

Fonte: Elaborada pela autora

Verifica-se que as emissões de CO₂ geradas pelo consumo de cimento, nos concretos executados nessa pesquisa, representam em média 98% das emissões totais (cimento + agregado graúdo). Neste caso, a carbonatação dos concretos não se demonstrou tão representativa para a melhoria da ecoeficiência, como pode ser percebido na Figura 65.

Figura 65 – Emissão de CO₂ relativa aos agregados graúdos (m³) somada ao consumo de cimento por unidade de resistência dos concretos estudados



Fonte: Elaborada pela autora

Há uma tendência de manutenção nas emissões de CO₂ para as classes de resistência de 30 MPa a 45 MPa e que se destacam pela maior resistência mecânica e menor emissão relativa os concretos com AGN e AGRC-P de menor relação a/c. Esses dois últimos apresentam emissões inferiores a 5 kgCO₂/MPa, enquanto que nos demais concretos esse valor é 10% superior, no mínimo.

Percebe-se que as emissões relativas ao consumo de cimento são em torno de 40 vezes superiores às dos agregados. Dessa forma, ainda que seja substituído 100% do agregado graúdo natural e que todo o agregado reciclado empregado seja carbonatado,

5. CONCLUSÃO

Após a apresentação da literatura, dos métodos e materiais utilizados e dos resultados alcançados, este capítulo finaliza o a pesquisa apresentando as considerações finais e propondo assuntos para novos trabalhos a partir de questões que surgiram ou que não puderam ser respondidas.

5.1. Considerações finais

Neste trabalho foram desenvolvidos dois métodos de tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto e, após isto, os agregados foram empregados em novos concretos. Para analisar os resultados deste emprego, foram realizados ensaios com os agregados reciclado e também como com os concretos no estado fresco e endurecido.

Após o tratamento, a **massa específica dos agregados** apresentou aumento de 0,4% e de 2,8% para o AGRC-P e para o AGRC-C, respectivamente. Para o AGRC-C, esse efeito é, provavelmente, devido à massa específica dos produtos gerados na carbonatação.

Ambas as formas de tratamento acarretaram na redução da **absorção de água do AGRC**. Até os 30 minutos, o AGRC-C apresentou valores inferiores aos demais agregados reciclados e, a partir desse momento, o aumento na absorção passou a superar os valores apresentados pelo AGRC-P. Na absorção total, o tratamento pozolânico apresentou o melhor desempenho, reduzindo 43% a absorção de água, enquanto que a carbonatação gerou redução de 23%.

A partir de **análise microestrutural**, foi possível identificar a redução da porosidade interna dos agregados reciclados e a melhoria da zona de transição entre agregado e argamassa nova. No AGRC-P foi verificada a colmatação de poros maiores e no AGRC-C foram identificados produtos de carbonatação por todo o agregado. Baseando-se na bibliografia, tais produtos foram identificados como calcitas.

No ensaio de **abatimento de tronco de cone** foi realizado ajuste da consistência inicial dos concretos com aditivo superplastificante. Dessa forma, não foi possível identificar a influência do tratamento dos agregados nesse ensaio tanto na medida inicial quando na perda de consistência ao longo do tempo.

A **resistividade elétrica no estado fresco** refletiu os efeitos da presença e do tratamento do AGRC no concreto. Verificou-se que o AGRC-C resultou em estabilidade da

resistividade dos concretos ao longo de todo o período de ensaio. Os MCV que se desprenderam da superfície do AGRC-P aumentaram o volume de sólidos da pasta, o que elevou a resistividade do concreto. O AGRC-R, ao absorver água da mistura do concreto, liberou bolhas de ar, que aumentaram a resistividade dos concretos.

O emprego de agregado tratado por carbonatação reduziu a **absorção de água por capilaridade dos concretos**, apresentando os menores valores deste estudo. Já o tratamento do AGRC com MCV induziu ao aumento da absorção de água, creditando-se esse comportamento ao provável refinamento da estrutura de poros, devido à liberação de microfios de cerâmica para a pasta de cimento do novo concreto.

O tratamento dos agregados reciclados por impregnação com MCV aumentou significativamente, em relação aos agregados carbonatados, a **resistência à compressão** dos concretos produzidos com relação a/c 0,45, equiparando-se ao concreto com agregado natural. Já o tratamento por carbonatação manteve os valores de resistência dos concretos similares aos concretos com agregados sem tratamento. Nos concretos produzidos com as demais relações a/c, o emprego de AGRC, com ou sem tratamento, não apresentou efeito significativo na resistência à compressão, e os seus valores equipararam-se aos valores de resistências do concreto com agregado natural.

A **ecoeficiência** dos concretos foi medida em kg de CO₂ por unidade de resistência mecânica. Nesta, verificou-se uma tendência similar de comportamento para os concretos contendo AGN, AGRC-R e AGRC-P. Para os dois últimos, a incorporação do resíduo na mistura gerou redução de 40% nas emissões, porém ao mesmo tempo reduziu a resistência mecânica média, acarretando em valores comparáveis aos dos concretos com AGN.

Os concretos contendo AGRC-C destacaram-se nesse quesito por apresentarem as menores taxas de emissão de CO₂, reduzindo, em média, 49% em relação aos demais concretos. Essa redução ocorre porque durante carbonatação ocorre **sequestro de gás carbônico** do meio ambiente, gerando balanceamento das emissões. O AGRC-C apresenta sequestro de CO₂ superior à sua emissão ao ambiente.

Por fim, verifica-se que os tratamentos estudados para o agregado reciclado empregado nesta pesquisa geraram redução na porosidade e absorção de água. Para os concretos com AGRC-P os benefícios são percebidos no aumento das resistências mecânicas. E os concretos que empregam AGRC-C tiveram como principais benefícios o aumento da durabilidade e sequestro de carbono.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento do trabalho são geradas dúvidas que acabam não sendo sanadas, seja por falta de tempo hábil ou por restrição de recursos. Dessa forma, alguns assuntos verificados que podem vir a elucidar e complementar os conceitos desenvolvidos neste trabalho são:

- Analisar a porosidade reduzida nos agregados reciclados pelas diferentes formas de tratamento;
- Estudar outros teores de substituição como forma ampliação dos efeitos do tratamento dos agregados;
- Estudar o abatimento dos concretos sem a utilização de aditivo superplastificante;
- Estudar a microestrutura dos agregados e da interface entre agregados e argamassa, alcançando-se uma seção interna da amostra sem o uso de serra;
- Realizar a carbonatação natural de agregados e analisar aplicação destes em novos concretos.

REFERÊNCIAS

- ALNAHHAL, M. F.; ALENGARAM, J.; JUMAAT, M. Z.; ALSUBARI, B.; ALGEDRA, M. A.; HUNGMO, K. Effect of aggressive chemicals on durability and microstructure properties of concrete containing crushed new concrete aggregate and non-traditional supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 163, n. 28, p. 482-495, Feb. 2018.
- AMER, A. A. M.; EZZIANE, K.; BOUGARA, A.; ADJOU DJ, M. Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, n. 123, p. 300-308, 2016.
- ALLEN, A. J.; THOMAS, J. J.; JENNINGS, H. M. Composition and density of nanoscale calcium–silicate–hydrate in cement. **Nature**, v. 6, p. 311-316, Apr. 2007.
- ASHRAF, W. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. **Construction and Building Materials**, n. 120, p. 558-570, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, SP, 2016. Disponível em: http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm. Acesso em: 21 jan. 2018.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). 2008. **Dados do Setor**. Disponível em: <anicer.com.br/setor>. Acesso em: 15 dez. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 45**. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR NM 53**. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **NBR NM 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR NM 10342**: Concreto – Perda de abatimento – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C143/C143M**: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. EUA, 2015.

ATKINS, P.; JONES, B. **Princípios de Química**: Questionando a Vida Moderna. Tradução de Ricardo Bicca de Alencastro. 5. ed. Porto Alegre: ARTMED® EDITORA S.A., 2012, 1047 f. Livro Eletrônico.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; MINOCHA, A. K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, n. 68, p. 501-516, 2014.

BELIN, P.; HABERT, G.; THIERY, M.; ROUSSEL, N. Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates. **Materials and Structures**, n.47, p. 1451-1465, 2014.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M. ABREU, A. G. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 8, p. 65-76, jul./out. 2008.

BRAUN, C. E. **Determinação da relação água-cimento de concretos com adições no estado fresco através do método da resistividade elétrica**. 2014. 182 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2015.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKASHI, H. Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 496-507, Feb. 2018.

BUILDER. **CONTROLMIX 90**. FT nº 052. 2016. Disponível em: <http://www.builder.ind.br/site/images/produtos/41/FT%20052%20-%20CONTROLMIX%2090.pdf>. Acesso em 21/07/2017.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. 535 f. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2007.

CARTUXO, F.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; JIMÉNEZ, J. R.; LEDESMA, E. F. Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer. **Construction and Building Materials**, n. 89, p. 36-47, 2015.

CASCUDO, O; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. **Concreto ciência e tecnologia**. Vol 1, cap 24. São Paulo. 2011

CAVALHEIRO, A. P. **Contribuição para a implementação de agregado reciclado de concreto em uma empresa de pré-fabricados de concreto**. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, 2011.

CECCONELLO, V. **Avaliação de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto e cinza de casca de arroz, com ênfase na retração**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2013.

CIZER, Ö.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; RUIZ-AGUDO, E.; ELSEN, J.; VAN GEMERT, D.; VAN BALEN, K. Phase and morphology evolution of calcium carbonate precipitated by carbonation of hydrated lime. **Journal of Materials Science**, n. 47, p. 6151-6165, nov. 2012.

CLAISSE, P. A.; EL-SAYAD, H.; SHAABAN, I. G. Permeability and Pore Volume of Carbonated Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 3, p. 587-583, mai-jun. 1999.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN (CPH). **EHE 08 – Anejo 15**. Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. Madrid, 2008.

CORDEIRO, G. C.; DÉ SIR, J. M. Potencial de argila caulínica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**, São Paulo, n. 56, p. 71-76, 2010.

CUI, H.; TANG W.; LIU, W.; DONG Z.; XING F. Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Building Materials**, n. 93, p. 522-527, 2015.

CUNHA, I. B. **Quantificação das emissões de CO₂ na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), Porto Alegre, 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 1 ed. 2011. v. 1, cap. 8, p. 261-309.

DIAS, W. P. S. Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation. **Cement and Concrete Research**, n. 30, p. 1255-1261, mai. 2000.

ECKERT, M.; OLIVEIRA, M. Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. **Construction and Building Materials**, n. 133, p. 416-424, Feb. 2017.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735-742, May 2007.

FASTOFSKI, D. F.; SCHÄFER, M.; TELES, R. D.; KULAKOWSKI, M. P.; GONZÁLEZ, M. A. S.; KAZMMIERCZAK, C. S. Metodologia de caracterização de resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material pozolânico em pasta de cimento. In: Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, 5., 2014, São Leopoldo. **Anais...** Porto Alegre: Instituto Venturi, 2014.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto.** 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2013.

FERNANDES, A. J. M. M. **Influência do teor de sílica e alumina no comportamento pozolânico de materiais cimentícios suplementares.** 2018. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2018 – Em desenvolvimento.

FIGUEIREDO E. P.; MEIRA G. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. **Boletim Técnico 6.** – ALCONPAT Internacional, Merida, 2013.

FRAJ, A. B.; IDIR, R. Concrete based on recycled aggregates – Recycling and environmental analysis: A case study of paris' region. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 21-28, Dec. 2017.

FRÖHLICH, J.; HENTGES, T. I.; KULAKOWSKI, M. P. Emprego de Agregados Reciclados de Concreto Carbonatados na Produção de Novos Concretos. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 1, n. 2, p. 3-9, 2014.

GALAN, I.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. Natural and accelerated CO₂ binding kinetics in cement paste at different relative humidities. **Cement and Concrete Research**, v. 49, p. 21-28, Jul. 2013.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma Alternativa como Material Pozolânico. **Cerâmica Industrial**, n. 19, v. 4, p. 31-38, jul/ago. 2014.

_____. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de São Paulo. **Cerâmica**, n. 61, p. 251-258. 2015.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. **Cement and Concrete Research**, n. 32, p. 1301-1311, 2002.

GONÇALVES, M. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos.** 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2011.

GONÇALVES, M.; CAVALHEIRO, A.; KULAKOWSKI, M.; KAZMIERCZAK, C. S. Reciclagem de resíduos de concreto na pré-fabricação: análise da viabilidade técnica em escala laboratorial. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2012. (a).

_____. Evaluation of concrete made with coarse recycled aggregate from precast concrete. In: WASCON 2012 Conference proceedings. **Anais...** Iscowa, 2012. (b).

GOTO, S.; SUENAGA, K.; KADO, T.; MINORU, F. Calcium Silicate Carbonation Products. **Journal of the American Ceramic Society**. v. 78, n. 11, p. 2867-2872, jun. 1995.

GUILLANTE, P.; KULAKOWSKI, M. P.; MANCIO, M. Use of fired-clay brick waste as supplementary cementitious material and alkali-activated cement: influence on alkali-aggregate reaction. In: International Conference on Durability of Building Materials and Components, XIV., 2017, Ghent. **Proceedings...**Paris: RILEM Publications S.A.R.L, 2017.

GUILLANTE, P.; VALENNTINI, P.; KULAKOWSKI, M. P.; ABREU, A. G. Efeito sinérgico da cinza de casca de arroz e do resíduo de cerâmica vermelha na mitigação da RAA. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 5., 2017, Fortaleza. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2017

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; ALGIN, Z.; Yazıcı, H. Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, n. 113, p. 622-630, 2016.

HAMAD, B. S.; DAWI, A. H. Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, p. 228-239, Dec. 2017.

HANSEN, D. M. **Avaliação das propriedades pozolânicas de um resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material cimentício suplementar**. 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

HANSEN, D. M.; BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P. Avaliação da geração e quantificação do resíduo de cerâmica vermelha. In: Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, 7., 2016, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Instituto Venturi, 2016.

HEINECK, S. **Desempenhos de argamassas de revestimentos com incorporação de agregados reciclados de concreto**. 2012. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

HENTGES, T. I. **Avaliação da relação entre resistividade elétrica e as propriedades de concretos com cinza de casca de arroz e aditivo superplastificante no estado fresco e endurecido**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2015.

HENTGES, T. I.; KULAKOWSKI, M. P.; MANCIO, M. Influência da cinza de casca de arroz e de aditivos superplastificantes na resistividade elétrica do concreto no estado fresco. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 4., 2015, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2015.

HENTGES, KULAKOWSKI M. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; SARTORI B. R. C. Carbonatação acelerada e natural em amostras de concreto com agregado reciclado de concreto e cinza de casca de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 2016, Belém. **Anais...**São Leopoldo: Casa Leiria, 2016.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1923-1930, dez. 2002.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil**: Relatório de Pesquisa. Brasília, DF, 2012.

Disponível em:

http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf. Acesso em: 21 jan. 2018.

ITAMBÉ. **RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO**: CP II-F-40. Disponível em:

<http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=28978&chave=2017-7>. Acesso em 02 out. 2017.

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. Trabalho de conclusão (mestrado profissional) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Porto Alegre, 2005.

JORDANI, B. **Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna em concreto com cinza de casa de arroz**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

KATZ, A. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. **Journal of materials in civil engineering**, v. 16, n. 6, p. 597-603, dez. 2004.

KAUTZMANN, V. O.; HENTGES, T. I.; KULAKOWSKI, M. P.; MANCIO, M. Emprego da estabilização da hidratação do cimento para estudo da resistividade elétrica de concreto no estado fresco com agregado graúdo reciclado de concreto. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 5., 2017, Fortaleza. **Anais**. Belém: ANTAC, 2017.

KAUTZMANN, V. O. **Avaliação do emprego de carbonatação acelerada em agregado graúdo reciclado de concreto como forma de beneficiamento e sequestro de CO₂**. 2018. 26 f. Relatório de bolsa (Iniciação Científica). – Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2018.

KAZAZ, A.; ULUBEYLI, S.; ER, B.; ARSLAN, V.; ATICI, M.; ARSLAN, A. Fresh Ready-Mixed Concrete Waste in Construction Projects: A Planning Approach. **Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal**, v. 7, p. 1280 – 1288, Fev. 2015.

KAZMIERCZAK, C. S. Produtos de cerâmica vermelha. In: ISAIA, G. C. (ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010, v. 1, cap. 18, p. 565-588.

KIOURANIS, A.; MIRANDA, L. F. R.; MELO NETO, A. A. de. Agregados reciclados em concretos: uma análise crítica das propriedades e classificações estabelecidas em diferentes normas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

KONG, D.; LEI, T.; ZHENG, J.; MA, C.; JIANG, J.; JIANG, J. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, i. 5, p. 701-708, May. 2010.

KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, i.8, p. 649-654, Sep. 2010.

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

KURDA, R.; BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 554-572, Dec. 2017.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. **LNEC E 471**. Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. Lisboa, 2009.

LEDUR, R. L. B. **Avaliação da aplicabilidade do método da resistividade elétrica para auxiliar no controle de qualidade durante a produção em central dosadora de concreto**. 2017. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2017.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001.

LEITE; M. B.; COSTA, J. A. Estudo da influência do agregado reciclado de concreto de pré-moldados na resistência do concreto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2014.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, . 81, P. 38-48, Mar. 2016.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. 2010. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, SP, 2010.

LIMBACHIYA, M. C.; T. LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures**, v. 33, p. 574-580, Nov. 2000.

MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. **Sustainability**, n. 2, p. 1204-1225, 2010.

MANCIO, M.; BRAUN, C. E.; FIGUEIREDO, R. M. FLÔRES, E. O.; Equipamento para Aferição da Resistência à Compressão do Concreto e Método para Medição da Resistividade Elétrica do Concreto. **Relatório Descritivo de Patente de Inovação**. Instituto Nacional de Propriedade Industrial. 2017.

- MANCIO, M.; MOORE, J. R.; BROOKS, Z.; MONTEIRO, P. J. M.; GLASER, S. D. Instantaneous in-situ determination of water-cement ratio of fresh concrete. **ACI Materials Journal**, v. 107, n. 6, p. 587-583, nov-dez. 2010.
- MAS, M. A.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; REIG, L.; BORRACHERO, M. V. “Ceramic tiles waste as replacement material in Portland cement”. **Advances in Cement Research**, v. 28, n. 4, p. 221-232, 2016.
- MATIAS, D.; BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. **Construction and Building Materials**, n. 44, p. 101-109, 2013.
- MATSCHKEI, T.; LOTHENBACH, B.; GLASSER, F. P. The role of calcium carbonate in cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 37, i. 4, p. 551-58, Apr. 2007.
- MCGINNIS, M. J.; DAVIS, M.; ROSA, A.; WELDON, B. D.; KURAMA, Y. C. Quantified sustainability of recycled concrete aggregates. **Magazine of Concrete Research**, v. 69, i. 23, p. 1203-1211, Dec. 2017.
- MCNEIL, K.; KANG, T. H. K. Recycled Concrete Aggregates: A Review. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 1, p. 61-69, mar. 2013.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. Mc Graw Hill Education. 2015 (livro eletrônico).
- MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009.
- MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M.; JIN, F.; AL-TABBAA, A.; WANG, A. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 138-145, Oct. 2017.
- MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 153-170, Feb. 2014.
- NEPOMUCENO, M. C. S.; ISIDORO, R. A. S.; CATARINO, J. P. G. Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 284-294, Mar. 2018.
- NOGUEIRA, J. R. S. **Avaliação da influência do método de mistura nas propriedades de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2015. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.
- OLIVEIRA, M. E. D.; SALES, R. J. M.; OLIVEIRA, L. A. S. CABRAL, A. E. B. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 13, p. 219-224, jul/set. 2011.

OMRANE, M.; KENAI, S.; KADRI, E. H.; AÏT-MOKHTAR, A. Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 415-430, Nov. 2017.

PACHECO, J.; HELENE, P. Controle da Resistência do Concreto. **Boletim Técnico 9**. – ALCONPAT Internacional, Merida, 2013.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 832-838, Mar. 2010.

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 4, p. 363-373, Jul.-Ago. 1991.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e modelos de predição**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil– PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 07-20, out./dez. 2007.

PINHEIRO, I. S. **Beneficiamento e caracterização de resíduos gerados na produção de blocos cerâmicos visando à aplicação como adição pozolânica**. 2008. 154 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31-36, Jan. 2004.

POSSAN, E.; FELIX, E. F. Captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto durante o ciclo de vida das estruturas. In.: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT2016., 2016, **Anais**. Belém. p. 731 a 738.

QUATTRONE, M.; CAZACLIU, B.; ÂNGULO, A. C.; HAMARD, E.; COTHENET, A. Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production? **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 690-703, Oct. 2016.

REIG, L.; TASHIMA, M. M.; BORRACERO, M. V.; MONZÓ, J.; CHEESEMAN, C. R.; PAYÁ, J. Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 98-106, jun. 2013.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 707-712, may. 2001.

SALAS, A.; BRAND, A. S.; ROESLER, J. R.; ARBOLEDA, C.; LANGE, D. A. **Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements**. Technical Report Documentation Page. Center of Excellence for Airport Technology (CEAT). Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois. Urbana, IL. 2013.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Revista ambiente construído**, v.14, n.1 p.113-125, Porto Alegre, 2014.

SANTOS, W. F. **Tratamento superficial dos agregados reciclados de RCD com hidrofugantes**. 2016. 166 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia e Construção Civil. São Paulo, 2016.

SANTOS, W. F.; QUATTRONE, M.; JOHN, V. M.; ANGULO, S. C. Roughness, wettability and water absorption of water repellent treated recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 502-513, Aug. 2017.

SARTORI, B. R. C. **Estudo da carbonatação em concretos com agregado graúdo reciclado de concreto e cinza de casca de arroz**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2013.

SARTORI, B.; HENTGES, T.; KULAKOWSKI, M.; KAZMIERCZAK, C.; MANCIO, M. Natural and accelerate carbonation in concretes with rice husk ash and recycled concrete aggregate: comparison by water absorption and mechanical strength. In.: International Conference on Durability of Building Materials and Components – DBMC, 14., 2017. **Anais...** Ghent.

SCHAFER, M.; ERHART, R.; SOUZA, R.; JORDANI, B.; MANCIO, M.; KULAKOWSKI, M. Influência da utilização de cinza volante e cinza de casca de arroz na resistência à compressão e na taxa de absorção de água de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto. Natal, 2014. In.: 56º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** São Paulo, 2014.

SPORTING CLUBE DE PORTUGAL (SCP). A História dos Estádios. Disponível em: <http://www.sporting.pt/pt/clube/historia/estadios>. Acesso em: 08 dez. 2017.

SCRIVENER, K.; BAZZONI, A.; MOTA, B.; ROSSEN, J. E. Electron microscopy. In: SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. (Ed.). **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Boca Raton: CRC Press, 2016. Cap. 8, p. 351-418.

SEBASTIANY, L. D. **Avaliação de métodos de determinação do potencial pozolânico de resíduos da indústria de cerâmica vermelha**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014

SHAO, Y.; WANG, S. Carbonation Curing of Cement Bonded Fiberboard Made by Slurry-Dewatering Process. **ACI Materials Journal**, Special Publication, v.260, p. 125-138, jan. 2009.

SHAYAN, A.; XU, A. Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 100, i. 5, p. 371-380, Jan. 2003.

- SHI, C.; LI, Y.; ZHANG, J.; LI, W.; CHONG, L.; XIE, Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. **Journal of Cleaner Production**, n.112, p. 466-472, 2016.
- SHI, C.; WU, Z.; CAO, Z.; LING, T. C.; ZHENG, J. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 130-138, Feb. 2018.
- SILVA, A. J. Reciclagem de resíduos produzidos pela indústria de pré-moldados em concreto na região de Chapecó – SC. **Revista Especialize On-line IPOG**, v. 01/2014, n. 009, dez. 2014.
- SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE OLARIA E DE CERÂMICA PARA CONSTRUÇÃO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (SINDICER). **Diagnóstico da Indústria da Cerâmica Vermelha no Estado do Rio Grande do Sul**. 60 p. Relatório de Pesquisa. Porto Alegre, 2008.
- SOUTO-MARTINEZ, A.; DELESKY, E. A.; FOSTER, K. E. O.; SRUBAR III, W. V. A mathematical model for predicting the carbon sequestration potential of ordinary portland cement (OPC) concrete. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 417-427, Aug. 2017.
- SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). **Engenharia Civil**, n. 15, p. 45-54, 2002.
- SPAETH, V.; TEGGUER, A. D.; Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 2, i. 2, p. 143-152, 2014.
- SZPOGANICZ, B.; DEBACHER, N. A.; STADLER, E. **Experiências de Química Geral**. Florianópolis: FEESC, 2 ed. 2005.
- TABSH, S. W.; ABDELFAHAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1163-1167, 2009.
- TAI, C.; CHEN, F. B. Polymorphism of CaCO₃, precipitated in a constant-composition environment. **AIChE Journal**, v. 44, n. 8, p. 1790-1798, aug. 1998.
- TALUKDAR, S.; BANTHIA, N. Carbonation in Concrete Infrastructure in the Context of Global Climate Change: Model Refinement and Representative Concentration Pathway Scenario Evaluation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 4, 2015.
- TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. F. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, i. 6, p. 1195-1203, Ju. 2005.
- TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMAsc. **Construction and Building Materials**, n. 22, p. 2068-2077, 2008.

TANGCHIRAPAT, W.; RATTANASHOTINUNT, C.; BURANASING, R.; JATURAPITAKKUL, C. Influence of Fly Ash on Slump Loss and Strength of Concrete Fully Incorporating Recycled Concrete Aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, i. 2, p. 243-251, Feb. 2013.

THIERY, M. **Modelisation de la carbonatation atmospherique des materiaux cimentaires**. Tese (doutorado) – L’ecole Nationale des Pontes et Chaussees. França, 2005.

THIERY, M.; VILLAIN, G.; DANGLA, P.; PLATRET, G. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. **Cement and Concrete Research**, West Lafayette , n. 37, p. 1047-1058, 2007.

TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B.; FAIRBAIRN, E. M. R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1357-1365, set. 2007.

TROIAN, A.; WERLE, A. P.; KULAKOWSKI, M. P.; KAZMIERCZAK, C. S. Chloride Ions Penetration in Concrete with Recycled Concrete. In.: International Conference on Durability of Building Materials and Components – DBMC, 7., 2011. **Anais...** Porto. p. 1717 a 1724.

VIEIRA, L. B. P. **Implantação de modelo sustentável para centrais dosadoras de concreto**. Redução do volume de resíduos com o uso de estabilizador de pega em centrais dosadoras de concreto. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. Disponível em: http://www.ibracon.org.br/eventos/52cbc/LUIZ_DE_BRITO.pdf.

VIEIRA, L. B. P.; FIGUEIREDO, A. D. Resíduos da concreteira: o aproveitamento do problema. **Concreto**, v. 71, p. 49-53, Jul. 2013.

VYNCKE, J.; VRIJIDERS, J. Recycling of C&D Waste in Belgium: State-of-the-art and opportunities for technology transfer. In: International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2., 2010, Ancona. **Proceedings...** Disponível em: <http://www.claisse.info/2010%20papers/p19.pdf>.

WEI, X.; LI, Z. Early Hydration Process of Portland Cement Paste by Electrical Measurement. **Journal of materials in civil engineering**, v. 18 (1), p. 99-105, jan/fev. 2006.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação**. 2010. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

WERLE, A. P.; TROIAN, A.; ALCÂNTARA, J.; KULAKOWSKI, M. P.; KAZMIERCZAK, C. S. Análise de metodologias utilizadas para a caracterização da absorção de água de concreto reciclado como agregado. In.: Encontro Nacional de tecnologia do ambiente construído – ENTAC, 13., 2010, Canela. **Anais Eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/entac2014/2010/arquivos/472.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2016.

XIAO, J.; LEI, B.; ZHANG, C. On carbonation behavior of recycled aggregate concrete. **Science China Technological Sciences**, v. 55, i. 9, p. 2609-2616, Sep. 2012.

XIAO, J.; LI, W.; SUN, Z.; LANGE, D. A.; SHAH, S. P. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 276-292, Mar. 2013.

XUAN D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 67-74, Jan. 2016.

XUAN D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 214-221, Nov. 2017.

YOUNIS, K. H.; PILAKOUTAS, K. Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, n. 49, p. 688-701, 2013.

ZHANG, J.; SHI, C.; LI, Y.; PAN, X.; POON, C. S.; XIE, Z. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 1-7, Nov. 2015.

ZHAO, Z.; REMOND, S.; DAMIDOT, D.; COURARD, L.; MICHEL, F. Improving properties of recycled concrete aggregates by accelerated. In.: SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS & TECHNOLOGIES, 4., 2016. **Anais...** Las Vegas.

ZHENG, L.; WU, H.; ZHANG, H.; DUAN, H.; WANG, J.; JIANG, W.; DONG, B.; LIU, G.; ZUO, J.; SONG, Q. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 405-413, Apr. 2017.

ZHU, Y. G.; KOU, S. C.; POON, C. S.; DAI, J. G.; LI, Q. Y. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, i. 1, p. 32-38, Jan. 2013.

APÊNDICE A

Tratamento do AGRC por impregnação de resíduo de cerâmica vermelha em pó

Figura A1 – Material decantado após 24 horas parado



Figura A2 – Peneiramento do AGRC após tratamento pozolânico



Figura A3 – Tratamento pozolânico realizado separadamente para cada fração granulométrica



APÊNDICE B

Processo de determinação do teor de argamassa (passo a passo)

- 1) Determinar da massa seca inicial (M_i);
- 2) Colocar em forno mufla a 800°C por 3 horas;
- 3) Tirar do forno e colocar direto em água fria, de forma que a água que penetrar nos poros da argamassa sofra superaquecimento imediato e expansão, gerando enfraquecimento e desagregação da argamassa. Nesse passo, é colocada uma tela metálica no tanque com água para que não ocorra perda de material;
- 4) Secar o material em estufa a 100°C por 24 horas;
- 5) Envolver a amostra em um pano e aplicar golpes com martelo de borracha de forma que ocorra a desagregação da argamassa ao agregado;
- 6) Excluir o material com dimensão inferior a 4,8 mm e registrar a massa retida (M_t);
- 7) Imergir o material em ácido e manter por 72 horas para remoção do restante de argamassa. O ácido utilizado nesta pesquisa foi o;
- 8) Retirar a amostra do ácido, lavá-la com água e secar o material restante em estufa a 100° C por 24 horas;
- 9) Excluir o material com dimensão inferior a 4,8 mm e também possíveis resquícios de argamassa;
- 10) Registrar a massa retida (M_f).

Previamente à utilização do ácido no agregado reciclado, foi realizado teste em amostra contendo apenas agregado graúdo natural, para verificação de possível perda de massa que acabou não ocorrendo.

O teor de argamassa presente no AGRC é calculado através da Equação 17.

$$\text{Teor de Argamassa} = \frac{M_i}{M_f} \times 100$$

Equação 17

APÊNDICE C

Resultados de resistência à compressão dos concretos

Tabela C1 – Resistência a compressão axial aos 7 dias dos concretos estudados

Agregado	a/c	Fc (MPa)	Fc médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Fc potencial (MPa)
AGN	0,45	52,26	50,41	1,80	3,58	52,26
		48,66				
		50,30				
	0,55	33,03	32,12	0,86	2,69	33,03
		32,00				
		31,31				
0,65	28,88	30,40	1,34	4,41	31,40	
	30,92					
	31,40					
AGRC-R	0,45	44,06	43,22	0,73	1,70	44,06
		42,85				
		42,74				
	0,55	27,36	30,81	3,76	12,19	34,81
		34,81				
		30,26				
0,65	25,22	26,50	1,27	4,79	27,76	
	27,76					
	26,52					
AGRC-P	0,45	49,64	50,38	0,81	1,62	51,25
		51,25				
		50,25				
	0,55	33,23	32,04	1,34	4,19	33,23
		30,59				
		32,30				
0,65	27,86	28,09	0,43	1,54	28,60	
	28,60					
	27,83					
AGRC-C	0,45	41,08	38,63	2,43	6,30	41,08
		36,21				
		38,62				
	0,55	35,39	36,43	1,01	2,78	37,42
		37,42				
		36,47				
0,65	25,56	25,44	0,63	2,47	26,01	
	26,01					
	24,76					

Tabela C2 – Resistência a compressão axial aos 28 dias dos concretos estudados

Agregado	a/c	Fc (MPa)	Fc médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Fc potencial (MPa)
AGN	0,45	62,34	59,97	2,41	4,01	62,34
		57,53				
	0,55	60,04	43,11	1,84	4,26	43,71
		43,71				
		42,50				
		40,10				
0,65	34,54	36,24	1,82	5,02	38,15	
	36,02					
AGRC-R	0,45	46,07	45,36	4,05	8,93	49,01
		49,01				
	0,55	41,00	42,74	1,89	4,43	44,92
		41,53				
		44,92				
		41,76				
0,65	33,82	33,89	0,30	0,87	34,21	
	33,63					
AGRC-P	0,45	55,46	58,61	2,73	4,66	60,28
		60,28				
	0,55	60,10	37,16	4,36	11,74	40,72
		38,47				
		40,72				
		32,29				
0,65	35,17	35,24	0,11	0,30	35,36	
	35,36					
AGRC-C	0,45	44,53	46,76	2,23	4,77	49,00
		46,73				
	0,55	49,00	41,17	1,39	3,37	42,48
		41,32				
		42,48				
		39,72				
0,65	36,23	36,07	0,50	1,38	36,47	
	35,51					
		36,47				

APÊNDICE D

Resistividade elétrica no estado fresco ao longo do tempo

Tabela D1 – Leitura nos voltímetros e resistividade ao longo para os concretos com AGN

T (min)	AGN								
	a/c 0,45			a/c 0,55			a/c 0,65		
	Vo	V	ρ	Vo	V	ρ	Vo	V	ρ
10	0,560	0,038	4,418						
20	0,573	0,040	4,505	0,494	0,051	6,667	0,522	0,050	6,186
30	0,578	0,040	4,501	0,498	0,051	6,605	0,517	0,051	6,329
40	0,573	0,038	4,320	0,516	0,049	6,083	0,519	0,051	6,338
50	0,569	0,037	4,194	0,510	0,046	5,863	0,512	0,049	6,172
60	0,571	0,037	4,220	0,514	0,045	5,646	0,515	0,049	6,182
70	0,574	0,039	4,345	0,517	0,045	5,655	0,510	0,048	6,078
80	0,577	0,039	4,325	0,518	0,048	5,942	0,512	0,047	5,966
90	0,576	0,038	4,295	0,526	0,049	5,971	0,520	0,048	5,953
100	0,569	0,038	4,270	0,529	0,049	5,978	0,525	0,047	5,818
110	0,571	0,038	4,295	0,534	0,049	5,885	0,528	0,046	5,626
120	0,552	0,038	4,440	0,534	0,049	5,958	0,509	0,047	5,997

Tabela D2 – Leitura nos voltímetros e resistividade ao longo para os concretos com AGRC-R

T (min)	AGRC-R								
	a/c 0,45			a/c 0,55			a/c 0,65		
	Vo	V	ρ	Vo	V	ρ	Vo	V	ρ
10	0,540	0,038	4,584	0,521	0,051	6,364	0,474	0,057	7,761
20	0,543	0,038	4,556	0,528	0,052	6,360	0,477	0,057	7,661
30	0,560	0,039	4,533	0,542	0,049	5,792	0,483	0,058	7,744
40	0,583	0,040	4,465	0,551	0,049	5,721	0,497	0,057	7,445
50	0,573	0,038	4,280	0,550	0,048	5,613	0,499	0,057	7,367
60	0,570	0,039	4,451	0,557	0,048	5,597	0,494	0,054	7,093
70	0,573	0,040	4,465	0,561	0,048	5,563	0,491	0,052	6,839
80	0,573	0,039	4,433	0,556	0,046	5,379	0,507	0,054	6,831
90	0,577	0,040	4,437	0,563	0,047	5,393	0,507	0,054	6,878
100	0,575	0,039	4,380	0,548	0,047	5,499	0,505	0,053	6,769
110	0,577	0,039	4,365	0,551	0,046	5,348	0,507	0,053	6,789
120	0,576	0,039	4,407	0,551	0,046	5,347	0,515	0,052	6,554

Tabela D3 – Leitura nos voltímetros e resistividade ao longo para os concretos com AGRC-R

T (min)	AGRC-P								
	a/c 0,45			a/c 0,55			a/c 0,65		
	Vo	V	ρ	Vo	V	ρ	Vo	V	ρ
10	0,531	0,044	5,351	0,504	0,048	6,112	0,497	0,052	6,776
20	0,539	0,045	5,390	0,515	0,048	6,019	0,504	0,052	6,657
30	0,538	0,043	5,180	0,528	0,049	5,951	0,515	0,053	6,587
40	0,540	0,043	5,116	0,520	0,048	5,891	0,507	0,051	6,473
50	0,553	0,044	5,073	0,528	0,047	5,705	0,517	0,052	6,474
60	0,546	0,043	5,083	0,522	0,046	5,666	0,500	0,050	6,391
70	0,561	0,043	4,967	0,530	0,046	5,579	0,520	0,050	6,230
80	0,563	0,043	4,892	0,538	0,045	5,419	0,511	0,049	6,213
90	0,555	0,042	4,826	0,543	0,046	5,487	0,521	0,050	6,134
100	0,565	0,042	4,777	0,549	0,046	5,352	0,527	0,050	6,121
110	0,562	0,041	4,731	0,549	0,046	5,373	0,523	0,051	6,335
120	0,565	0,042	4,762	0,544	0,045	5,280	0,527	0,051	6,249

Tabela D4 – Leitura nos voltímetros e resistividade ao longo para os concretos com AGRC-R

T (min)	AGRC-C								
	a/c 0,450			a/c 0,55			a/c 0,65		
	Vo	V	ρ	Vo	V	ρ	Vo	V	ρ
10									
20	0,574	0,036	4,068	0,527	0,045	5,528	0,505	0,049	6,303
30	0,587	0,037	4,102	0,544	0,046	5,423	0,516	0,050	6,216
40	0,579	0,036	3,998	0,544	0,044	5,263	0,528	0,051	6,179
50	0,588	0,037	4,064	0,550	0,044	5,202	0,516	0,050	6,210
60	0,587	0,037	4,088	0,536	0,044	5,277	0,533	0,050	6,010
70	0,589	0,037	4,094	0,554	0,045	5,219	0,522	0,047	5,826
80	0,588	0,037	4,097	0,531	0,043	5,227	0,535	0,049	5,896
90	0,580	0,037	4,102	0,541	0,044	5,252	0,535	0,049	5,848
100	0,590	0,038	4,121	0,555	0,046	5,288	0,530	0,048	5,888
110	0,554	0,037	4,294	0,540	0,044	5,277	0,545	0,049	5,824
120	0,571	0,037	4,220	0,545	0,045	5,325	0,546	0,049	5,812

APÊNDICE E

Perda de abatimento ao longo do tempo

Tabela E1 – Leituras de abatimento (mm) ao longo do tempo para os concretos AGN e AGRC-R

Tempo (min)	AGN			AGRC-R		
	a/c 0,45	a/c 0,55	a/c 0,65	a/c 0,45	a/c 0,55	a/c 0,65
6	125	110	115	100	150	120
15	95	95	115	80	130	70
30	65	70	90	50	70	55
45	45	60	60	35	60	45
60	40	35	50	20	45	40
75	30	30	30	10	30	30
90	25	20	25	10	30	25
105	20	15	15	10	25	25
120	15	10	10	5	20	10

Tabela E2 – Leituras de abatimento (mm) ao longo do tempo para os concretos AGN e AGRC-R

Tempo (min)	AGRC-P			AGRC-C		
	a/c 0,45	a/c 0,55	a/c 0,65	a/c 0,45	a/c 0,55	a/c 0,65
6	100	150	100	110	150	80
15	70	140	70	85	100	100
30	60	110	55	55	60	70
45	40	70	35	35	40	50
60	30	50	20	20	30	40
75	25	40	15	15	25	30
90	20	30	15	10	20	25
105	20	20	10	5	10	15
120	10	10	5	5	10	15

APÊNDICE F

Taxa de absorção capilar ao longo do tempo.

Tabela F1 – Taxa de absorção capilar ao longo do tempo dos concretos estudados

a/c	Tempo (min)	Absorção (g/cm ²)			
		AGN	AGRC-R	AGRC-P	AGRC-C
0,45	1	0,016	0,017	0,016	0,019
0,45	2	0,024	0,024	0,022	0,025
0,45	3	0,028	0,029	0,026	0,030
0,45	4	0,032	0,033	0,030	0,034
0,45	5	0,034	0,036	0,032	0,037
0,45	10	0,049	0,050	0,045	0,050
0,45	15	0,059	0,062	0,055	0,058
0,45	30	0,082	0,084	0,075	0,072
0,45	60	0,114	0,116	0,103	0,090
0,45	120	0,155	0,167	0,145	0,112
0,45	180	0,187	0,204	0,173	0,126
0,45	240	0,212	0,236	0,200	0,139
0,45	300	0,241	0,263	0,221	0,148
0,45	360	0,265	0,288	0,240	0,159
0,45	1440	0,352	0,389	0,343	0,221
0,45	2880	0,361	0,403	0,358	0,245
0,45	4320	0,367	0,411	0,363	0,254
0,45	6720	0,373	0,413	0,368	0,258
0,55	1	0,022	0,018	0,021	0,021
0,55	2	0,027	0,027	0,031	0,030
0,55	3	0,031	0,032	0,036	0,037
0,55	4	0,036	0,036	0,040	0,043
0,55	5	0,038	0,040	0,046	0,047
0,55	10	0,050	0,057	0,061	0,067
0,55	15	0,059	0,071	0,073	0,079
0,55	30	0,079	0,101	0,104	0,107
0,55	60	0,107	0,145	0,147	0,152
0,55	120	0,146	0,220	0,213	0,205
0,55	180	0,174	0,248	0,261	0,248
0,55	240	0,198	0,282	0,300	0,283
0,55	300	0,220	0,309	0,334	0,307
0,55	360	0,241	0,333	0,362	0,324
0,55	1440	0,332	0,419	0,446	0,370
0,55	2880	0,344	0,436	0,454	0,381
0,55	4320	0,348	0,440	0,458	0,387
0,55	6720	0,351	0,444	0,463	0,391
0,65	1	0,019	0,019	0,026	0,025
0,65	2	0,026	0,025	0,032	0,030

0,65	3	0,031	0,031	0,039	0,036
0,65	4	0,036	0,034	0,044	0,040
0,65	5	0,039	0,038	0,047	0,043
0,65	10	0,063	0,051	0,076	0,056
0,65	15	0,065	0,061	0,078	0,065
0,65	30	0,090	0,081	0,102	0,084
0,65	60	0,127	0,109	0,148	0,110
0,65	120	0,177	0,152	0,201	0,146
0,65	180	0,216	0,184	0,243	0,169
0,65	240	0,245	0,212	0,279	0,186
0,65	300	0,270	0,236	0,305	0,203
0,65	360	0,291	0,256	0,335	0,218
0,65	1440	0,366	0,382	0,438	0,296
0,65	2880	0,378	0,401	0,448	0,313
0,65	4320	0,382	0,408	0,455	0,323
0,65	6720	0,391	0,411	0,461	0,326