



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INFLUÊNCIA DA PRÉ-MOLHAGEM NAS
PROPRIEDADES DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO**

RAFAELA GAVA PADOVAN

São Leopoldo, Setembro de 2013.

Ficha catalográfica

P124i Padovan, Rafaela Gava
Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto / por Rafaela Gava Padovan. – 2014.
155 f. : il., 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.
Orientação: Prof. Dr. Claudio de Sousa Kazmierczak ;
Coorientação: Prof^ª. Dr^ª. Marlova Piva Kulakowski.

1. Agregado reciclado de concreto. 2. Pré-molhagem.
3. Trabalhabilidade. 4. Resistência à compressão.
5. Permeabilidade. I. Título.

CDU 666.972

Catlogação na Fonte:
Bibliotecária Vanessa Borges Nunes - CRB 10/1556

RAFAELA GAVA PADOVAN

**INFLUÊNCIA DA PRÉ-MOLHAGEM NAS PROPRIEDADES
DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO
RECICLADO DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

Co-Orientador: Prof^ª. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Banca examinadora: Prof^ª. Dra. Denise C. C. Dal Molin
Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo


São Leopoldo, Setembro de 2013.

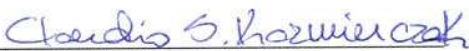
RAFAELA GAVA PADOVAN


**“INFLUÊNCIA DA PRÉ-MOLHAGEM NAS PROPRIEDADES
DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO
RECICLADO DE CONCRETO”**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 05 de setembro de 2013.



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Orientador - UNISINOS


Claudio de Souza Kazmierczak
Coordenador do PPGECC - UNISINOS


Prof.ª Dra. Marlova Piva Kulakowski
Coorientadora - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA


Prof.ª Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin - UFRGS


Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo - USP

Dedico essa conquista à minha mãe Lourdes,
ao meu pai Vicente,
com todo o meu amor,
e à minha dinda Zeny (*in memoriam*),
da qual sinto imensa saudade, quem sempre
frisou a importância na busca pelo
conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Há dois anos eu decidi me aventurar por um novo caminho, e graduada em Arquitetura e Urbanismo, optei pelo Mestrado em Engenharia Civil. Não foi simples voltar a estudar depois de ter entrado no mercado de trabalho e foi difícil conciliar o estudo com a vida profissional. Confesso que o caminho foi um pouco sinuoso, mas tantas foram as descobertas, repletas de esforço e superação, as quais resultaram em um amplo aprendizado e amadurecimento. Ao longo deste tempo conheci mestres que aprendi a admirar e colegas, cada um com suas próprias histórias e sacrifícios para vencer esta etapa. A concretização desta dissertação é o resultado de um longo período de trabalho, e este último desafio não teria o mesmo valor sem a contribuição de algumas pessoas. Quero aqui, expressar-lhes o meu agradecimento:

À Deus, pela saúde, proteção e sabedoria, e por guiar meus passos dia após dia e cuidar de mim durante todas as viagens até a universidade.

Ao meu querido orientador, o qual eu tenho muita admiração, Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak. Muito obrigada pela oportunidade, por acreditar no meu potencial e pela confiança que depositou em mim, pela paciência e por todos os ensinamentos transmitidos. Muito obrigada por tudo!

À minha co-orientadora, Prof^a. Dra. Marlova Piva Kulakowki, pela contribuição para o melhoramento deste trabalho, além do auxílio na análise estatística do mesmo.

À Prof^a. Dra. Andrea Parisi Kern, por ser a primeira pessoa a incentivar meu ingresso no Mestrado.

Aos demais professores do PPGEC, pelos conhecimentos transmitidos: Carlos Alberto Mendes Moraes, Feliciane Andrade Brehm, Jane Proszek Gorninski, Luiz Alcides Schiavo Miranda, Luciana Paulo Gomes e Marco Aurélio Stumpf González, o qual ofereceu importantes contribuições na análise estatística deste trabalho.

Ao professor Dr. Mauricio Mancio, pelas contribuições na banca de qualificação e no decorrer da dissertação.

Ao meu querido professor e orientador no curso de Arquitetura e Urbanismo, Vilmar Francisco Mayer, pelo exemplo, amizade e conselhos ao longo dos anos, e por despertar em mim o amor pela docência, que me trouxe até aqui.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CAPES, pela concessão da bolsa de estudos e FINEP, pelo financiamento da pesquisa.

Às empresas que gentilmente doaram alguns dos materiais utilizados nesta pesquisa: ao Arq. Douglas Henkes, representante da Votorantim Cimentos, pela doação do cimento e ao Eng. Leandro Bortoluzzi da Silva, representante da Basf, pela doação do aditivo.

Aos laboratoristas do LMC: Fellipe Tortelli, Ingrid Vergara Shorr, em especial ao Mauricio Schafer e Rodrigo Périco, que estiveram sempre presentes nas moldagens e na realização dos ensaios, tornando o trabalho mais leve e divertido. Muito obrigada!

Ao Jacson Castro, do Laboratório de Metalurgia Física/Fundição, ao Laboratório de Química e ao Eduardo Reis do ITT Fuse.

Aos bolsistas de iniciação científica: Letícia Zuchetto e ao querido Lucas Heberlé, pelo auxílio ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, pelo interesse, esforço e dedicação. Muito obrigada!

Aos companheiros de laboratório, alunos da Engenharia Civil e demais bolsistas, com quem compartilhei tantos momentos neste último ano. Obrigada pela amizade, pelo apoio, pelo auxílio e por tornarem as tantas horas de laboratório mais animadas.

Aos colegas do GMAT: Bruno Sartori, Leandro Marquette, Mateus Rosa e Vinício Ceconello, pelo companheirismo, pela amizade e por compartilharem comigo muitos momentos de nossas vidas acadêmicas e pessoais. Em especial à querida amiga Mariana Fedumentí, minha companheira nas madrugadas em frente ao computador, por todos os momentos que passamos juntas e dificuldades que superamos na engenharia, pela presença, amizade, apoio e pelas intermináveis risadas e momentos agradáveis que passamos juntas.

Aos demais colegas do mestrado, em especial: Eduardo R. Schneck, Josi Pires, Leandro Moosher e Suzete Schneider Nunes, pelo carinho e pelos laços de amizade.

Ao meu grande amigo e funcionário da biblioteca setorial do curso de Arquitetura, Juliano Zabka, por todo o apoio, e pelas nossas melhores e mais insanas conversas juntamente com o Augusto Probst e os guris da arquitetura. Vou sentir saudade de vocês outra vez!

Aos professores, colegas e amigos do curso de Arquitetura e Urbanismo, dos quais eu nunca me afastei, pois meu coração sempre me fez voltar.

Ao grande amor da minha vida, minha mãe, Lourdes Gava Padovan, pois tenho a certeza de que não existe, nem existirá ninguém no mundo que faça por mim tudo o que ela

fez e faz todos os dias. Uma grande mulher, minha melhor professora, meu orgulho, minha inspiração. Aquela que acompanha de perto todos os meus passos e me incentiva ao longo de toda a vida.

Ao meu pai, Vicente Padovan, um grande homem, meu eterno herói, por todo o amor e pelo apoio incondicional.

Aos meus pais agradeço por toda a dedicação e oportunidades que me proporcionaram em todos os anos de minha vida.

À minha tia Nelsa Gava, por todo o amor, pela torcida em todos os momentos e por todas as orações realizadas, mas principalmente pelo exemplo de coragem, força e fé que sempre demonstrou. Obrigada por acompanhar de perto todos os passos de cada uma das minhas conquistas.

Ao meu dindo Loreno A. Benedetti, pelo carinho, incentivo e por acreditar em mim e sempre torcer pelo meu sucesso.

À minha dinda Zeny Gava Benedetti, *in memoriam*, que tanto me amou, e da qual sinto imensa saudade, mas sei que continua a me acompanhar e se orgulhar de cada vitória ao longo desses anos. Quem sempre frisou a importância do estudo para a formação das pessoas, palavras das quais, levo comigo para sempre! Dinda, conquistei mais um diploma!

Ao meu amor, Ronaldo Delazzeri, que entrou em minha vida na fase de inscrição para o Mestrado e vivenciou cada passo rumo a este momento. Obrigada pelo apoio constante, pela paciência, compreensão, por todo o carinho e amor, por cada abraço, cada beijo e cada palavra de incentivo.

À dinda que eu escolhi e que tem representado tão bem este papel, Daniele Guarda, minha amiga, cúmplice, confidente, quem sempre me incentivou e me aconselhou em tantos momentos da vida. Dinda querida, obrigada por estar sempre presente!

Aos grandes amigos, que me deram forças para seguir em frente e avançar cada degrau rumo ao dia de hoje: Adriano Bolesina, Caroline Balestra, Caroline Medeiros, Elisa Corrêa, *mon professeur* Fernanda Facchini e Roberta Pasini, pelo incentivo e pelo apoio. Não posso deixar de citar o amigo Prof. Dr. Felipe Dalla Vecchia, por todo o incentivo para que eu ingressasse nesta etapa e durante a mesma. E aos amigos da vida inteira, ex-colegas, professores, pessoas de perto ou de longe, que por inúmeras vezes me apoiaram com palavras e ações e torceram pelo meu sucesso. Obrigada a cada um de vocês!

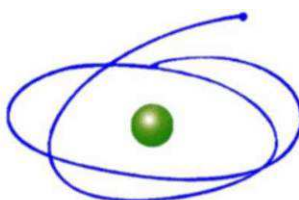
Impossível não citar o querido *Lenny*, fiel companheiro de minhas madrugadas em claro, que dorme ao meu lado enquanto escrevo estas páginas.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui, onde deixo um trabalho que certamente foi desenvolvido com muita dedicação e força de vontade, com o objetivo de contribuir com o desenvolvimento sustentável. Muito obrigada.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

CAPES – Coordenação de Programas Especiais / Programa de Apoio ao Ensino e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Engenharias – PRÓ-ENGENHARIAS.

FINEP – Financiadora de Estudos e Pesquisas.



C A P E S

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior



FINEP

FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	JUSTIFICATIVA	29
1.2	OBJETIVOS	31
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>31</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	<i>31</i>
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	32
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	32
2	REVISÃO DA LITERATURA	35
2.1	AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC)	35
2.1.1	<i>Composição granulométrica</i>	<i>36</i>
2.1.2	<i>Forma e textura das partículas.....</i>	<i>37</i>
2.1.3	<i>Massa unitária e massa específica</i>	<i>38</i>
2.1.4	<i>Absorção de água e porosidade do ARC.....</i>	<i>40</i>
2.1.5	<i>Argamassa aderida ao ARC</i>	<i>45</i>
2.2	TEOR DE UMIDADE DO ARC E FORMAS DE COMPENSAÇÃO DE ÁGUA.....	47
2.2.1	<i>Condição de umidade do ARC.....</i>	<i>48</i>
2.2.2	<i>Compensação de água na água de amassamento da mistura.....</i>	<i>51</i>
2.2.3	<i>Pré-molhagem</i>	<i>52</i>
2.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO PRODUZIDO COM ARC	55
2.3.1	<i>Trabalhabilidade</i>	<i>55</i>
2.3.2	<i>Massa específica no estado fresco.....</i>	<i>56</i>
2.3.3	<i>Resistência à compressão axial.....</i>	<i>56</i>
2.3.4	<i>Durabilidade.....</i>	<i>58</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
3.1	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	61
3.1.1	<i>Fatores de controle.....</i>	<i>63</i>
3.1.2	<i>Fatores de resposta</i>	<i>63</i>
3.1.3	<i>Fatores não controlados.....</i>	<i>64</i>
3.1.4	<i>Análise estatística dos resultados.....</i>	<i>64</i>
3.2	MATERIAIS.....	65
3.2.1	<i>Cimento.....</i>	<i>65</i>
3.2.2	<i>Agregados.....</i>	<i>66</i>
3.2.3	<i>Massa unitária e massa específica dos agregados.....</i>	<i>69</i>
3.2.4	<i>Absorção do ARC</i>	<i>70</i>
3.2.5	<i>Determinação do teor de argamassa aderida ao ARC.....</i>	<i>73</i>
3.2.6	<i>Água.....</i>	<i>75</i>
3.2.7	<i>Aditivo superplastificante</i>	<i>75</i>
3.3	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	76
3.3.1	<i>Definição dos traços dos concretos de referência e dos concretos com AGRC</i>	<i>77</i>
3.3.2	<i>Pré-molhagem do AGRC</i>	<i>77</i>
3.3.3	<i>Traços dos concretos de referência.....</i>	<i>80</i>
3.3.4	<i>Traços dos concretos sem aditivo.....</i>	<i>80</i>
3.3.5	<i>Traços dos concretos com AGRC com aditivo</i>	<i>80</i>
3.3.6	<i>Ordem de mistura dos materiais.....</i>	<i>81</i>
3.3.7	<i>Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova.....</i>	<i>85</i>
3.4	PROPRIEDADES AVALIADAS NOS CONCRETOS PRODUZIDOS	86
3.4.1	<i>Trabalhabilidade</i>	<i>86</i>
3.4.2	<i>Resistência à compressão aos 28 dias.....</i>	<i>87</i>
3.4.3	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	<i>87</i>
3.5	ARGAMASSAS EXTRAÍDAS DOS CONCRETOS	89
3.5.1	<i>Alteração do volume de vazios da argamassa em função do tempo de contato com o ARC.....</i>	<i>90</i>
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	93
4.1	RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CONCRETOS PRODUZIDOS	93

4.1.1	<i>Trabalhabilidade</i>	93
4.1.2	<i>Resistência à compressão axial aos 28 dias</i>	111
4.1.3	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	120
4.2	RESULTADOS OBTIDOS PARA AS ARGAMASSAS EXTRAÍDAS DOS CONCRETOS PRODUZIDOS	126
5	CONCLUSÃO	133
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	138
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
	APÊNDICE A	147
	APÊNDICE B	148
	APÊNDICE C	151
	APÊNDICE D	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento bibliográfico relativo à massa unitária e massa específica dos agregados reciclados de concreto.	40
Tabela 2 – Levantamento bibliográfico relativo à absorção de água dos agregados reciclados.	45
Tabela 3 – Levantamento bibliográfico relativo à porcentagem de argamassa aderida para diferentes frações granulométrica de ARC.....	46
Tabela 4 – Levantamento bibliográfico relativo aos teores de pré-molhagem do ARC.	54
Tabela 5 – Programa experimental – Caracterização da matéria-prima.....	62
Tabela 6 – Programa experimental – Concretos produzidos com AGRC.....	62
Tabela 7 – Programa experimental – Concretos produzidos com AGRC e argamassas equivalentes.	62
Tabela 8 – Características químicas do cimento Portland CPV-ARI RS.....	65
Tabela 9 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CPV-ARI RS.....	65
Tabela 10 – Características físicas do agregado miúdo natural.....	67
Tabela 11 – Características físicas do agregado graúdo natural.....	68
Tabela 12 – Características físicas do agregado graúdo reciclado de concreto.....	69
Tabela 13 – Massa unitária e massa específica dos agregados.....	69
Tabela 14 – Argamassa aderida no AGRC.....	75
Tabela 15 – Características físico-químicas do aditivo superplastificante.....	76
Tabela 16 – Quantidades de materiais e traços empregados nas misturas para os concretos sem aditivo.	83
Tabela 17 – Quantidades de materiais e traços empregados nas misturas para os concretos com aditivo.	84
Tabela 18 – Relação água/cimento e teor de água – concretos com AGRC sem aditivo e seus concretos de referência.	94
Tabela 19 – Abatimento ao longo do tempo – concretos produzidos com AGRC sem aditivo e seus concretos de referência, produzidos com AGN.....	96
Tabela 20 – Relação água/cimento e teor de água – concretos com AGRC com aditivo e seus concretos de referência.	97
Tabela 21 – Abatimento ao longo do tempo – concretos com produzidos com AGRC com aditivo e seus concretos de referência, produzidos com AGN.....	98
Tabela 22 – ANOVA para a perda de abatimento – concretos com AGRC sem aditivo.....	101
Tabela 23 – ANOVA para a perda de abatimento – concretos com AGRC com aditivo.	104
Tabela 24 – ANOVA para a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.	107
Tabela 25 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos com AGRC sem aditivo.	112
Tabela 26 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos com AGRC com aditivo.	115
Tabela 27 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos com AGRC com e sem aditivo.	118
Tabela 28 – Coeficientes de capilaridade obtidos para as amostras dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo e seus concretos de referência.....	123
Tabela 29 – Coeficientes de capilaridade obtidos para as amostras dos concretos produzidos com AGRC com aditivo e seus concretos de referência.	123
Tabela 30 – ANOVA para a absorção de água por capilaridade - concretos com AGRC sem aditivo.	125

Tabela 31 – ANOVA para a absorção de água por capilaridade - concretos com AGRC com aditivo.....	125
Tabela 32 – ANOVA para a absorção de água por capilaridade - concretos com AGRC com e sem aditivo.	126
Tabela 33 – Médias e coeficientes de variação para os resultados da determinação da quantidade de vazios das amostras de argamassa retiradas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo e suas amostras de referência, durante os tempos pré-determinados.	127
Tabela 34 – Médias e coeficientes de variação para os resultados da determinação da quantidade de vazios das amostras de argamassa retiradas dos concretos produzidos com AGRC com aditivo e suas amostras de referência, durante os tempos pré-determinados.....	129
Tabela 35 – ANOVA para a porosidade – argamassas dos concretos com AGRC sem aditivo.	130
Tabela 36 – ANOVA para a porosidade – argamassas dos concretos com AGRC com aditivo.	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma de atividades de pesquisa do GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem, onde se insere este trabalho.	30
Figura 2 – Ensaio de absorção de água ao longo do tempo em agregado graúdo reciclado de concreto.	42
Figura 3 – Ensaio de absorção por imersão do ARC e AN nos minutos iniciais.	42
Figura 4 – Ensaio de absorção por imersão dos ARC e AN ao longo do tempo.	43
Figura 5 – Absorção de água dos agregados reciclados (ARC-RCT e ARC-RCC) e AGN. ...	44
Figura 6 – Interfaces do agregado reciclado de concreto.	47
Figura 7 – Representação esquemática das condições de umidade do agregado.	49
Figura 8 – Representação esquemática do agregado não saturado imerso em água e detalhe de sua superfície na mistura do concreto.	50
Figura 9 – Representação esquemática do agregado saturado imerso em água e detalhe de sua superfície na mistura do concreto.	50
Figura 10 – Fluxograma da pesquisa.	61
Figura 11 – Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.	67
Figura 12 – Ensaio de absorção de água do AGN e AGRC.	71
Figura 13 – Absorção por imersão dos AGN e AGRC ao longo do tempo.	73
Figura 14 – Primeira etapa do ensaio para determinação do teor de argamassa aderida ao AGRC – choque térmico no AGRC.	73
Figura 15 – Primeira etapa do ensaio para determinação do teor de argamassa aderida ao AGRC – desintegração do agregado/argamassa.	74
Figura 16 – Segunda etapa do ensaio para determinação do teor de argamassa aderida ao AGRC – imersão em ácido clorídrico e material após ataque químico.	75
Figura 17 – Procedimento de pré-molhagem.	78
Figura 18 – Ordem de inserção dos materiais na betoneira.	81
Figura 19 – Etapas da moldagem das amostras de argamassa.	86
Figura 20 – Representação esquemática da preparação das amostras para ensaio de absorção de água por capilaridade.	88
Figura 21 – Esquema experimental utilizado por RILEM (1999).	88
Figura 22 – Etapas do ensaio de absorção de água por capilaridade.	89
Figura 23 – Amostras de argamassa após o período de cura estabelecido.	90
Figura 24 – Amostras de argamassa desmoldadas e identificadas.	90
Figura 25 – Abatimento ao longo do tempo – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo e seus concretos de referência.	100
Figura 26 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC sem aditivo.	102
Figura 27 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC sem aditivo.	102
Figura 28 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator T sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC sem aditivo.	103
Figura 29 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com aditivo.	104
Figura 30 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com aditivo.	105
Figura 31 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator T sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com aditivo.	106

Figura 32 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.	108
Figura 33 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.	109
Figura 34 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator T sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.	110
Figura 35 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AD sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.	110
Figura 36 – Resistência à compressão – concretos de referência produzidos com AGN com e sem aditivo.	111
Figura 37 – Resistência à compressão – concretos com AGRC sem aditivo.	112
Figura 38 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC sem aditivo.	113
Figura 39 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC sem aditivo.	114
Figura 40 – Resistência mecânica – concretos com AGRC com aditivo.	115
Figura 41 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com aditivo.	116
Figura 42 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com aditivo.	117
Figura 43 – Resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo.	117
Figura 44 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a resistência à compressão - concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo.	119
Figura 45 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo.	119
Figura 46 – Gráficos de médias do efeito isolado AD sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo.	120
Figura 47 – Absorção de água por capilaridade – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo e seus concretos de referência.	122

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas

AMN – Agregado miúdo natural

AN – Agregado natural

ANOVA – Análise de Variância

AGN – Agregado graúdo natural

AGRC – Agregado graúdo reciclado de concreto

ARC – Agregado reciclado de concreto

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil

CP – Corpo de prova

CPV-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem

IPT/EPUSP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

ITT Fuse – Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional

LMC – Laboratório de Materiais de Construção

NBR – Norma Brasileira de Regulamentada

NM – *Asociación Mercosur de Normalización*

P.A. – Puro para Análise

PIB – Produto Interno Bruto

PM – Pré-molhagem

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

REF – Referência

RCD – Resíduo de construção e demolição

RC – Resíduo de concreto

RILEM – *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SP – Superplastificante

SSS – Saturado com Superfície Seca

UEFS – Universidade Estadual de Feira de Santana

UFPA – Universidade Federal do Pará

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Unisinos – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

UR – Umidade Relativa

ZT – Zona de Transição

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c – Relação água/cimento

°C – Grau Celsius

cm – Centímetro

CO₂ – Dióxido de Carbono

F_{ck} – Resistência à compressão do concreto característica

F_{cj} – Resistência à compressão do concreto prevista para a idade de “j” dias

g – Grama

g/cm² – Grama por centímetro quadrado

g/cm³ – Grama por centímetro cúbico

h – Hora

H – Relação água/materiais secos

H₂O – Água

Kg – Quilograma

Kg/dm³ – Quilograma por decímetro cúbico

KN – Kilonewton

KWh – *Quilowatt*-hora

M – Massa

MgO – Óxido de Magnésio

MPa – Mega Pascal

mm – Milímetro

pH – Potencial hidrogeniônico

R² – Coeficiente de determinação

SO₃ – Óxido Sulfúrico

T – Temperatura

U – Umidade

μm – Micrômetro

V – Volume

γ – Massa específica

RESUMO

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. São Leopoldo, 2013. 155 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2013.

Os agregados reciclados de concreto, de um modo geral, apresentam elevada absorção de água, em função da sua maior porosidade. Esta absorção resulta em alterações no teor de água das misturas, e têm implicação direta sobre as propriedades microestruturais dos materiais à base de cimento, não sendo diferente com o agregado reciclado. Contudo, tais alterações ainda são pouco conhecidas nestes materiais. Esta pesquisa possui o objetivo de determinar a influência do processo de pré-molhagem do agregado no comportamento de concretos desenvolvidos através da incorporação de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) em substituição ao agregado graúdo natural (AGN). O teor de substituição do AGRC em relação ao AGN utilizado foi de 50% em relação ao volume do concreto. Previamente à utilização do AGRC, foi realizada uma pré-molhagem do material com percentuais na ordem de 40, 60, 80 e 100% da água relativa à absorção total do resíduo. Foram adotadas relações água/cimento iniciais de 0,45; 0,55 e 0,65. O abatimento foi fixado em 100 ± 20 mm, realizando-se uma compensação de água da mistura no teor necessário para atingir este abatimento. Num segundo grupo, a menor quantidade de água utilizada na produção dos concretos sem aditivo foi adotada para a produção dos mesmos concretos, com percentuais de pré-molhagem de 40, 60 e 80%, utilizando-se aditivo superplastificante ao invés de água para que fosse atingido o abatimento fixado. Verificou-se a influência da pré-molhagem do AGRC sobre as propriedades do concreto fresco, através da determinação da consistência ao longo do tempo; e do concreto endurecido, através da resistência à compressão e absorção de água por capilaridade dos concretos, e a alteração de porosidade de amostras de argamassa extraídas dos concretos frescos após diferentes tempos de contato com o agregado reciclado. Os resultados obtidos indicam que a trabalhabilidade e a resistência a compressão dos concretos com AGRC são pouco influenciadas pelo teor de pré-molhagem, enquanto que a permeabilidade a água e o teor de vazios existente na argamassa da mistura sofrem influência significativa: nos concretos com AGRC sem aditivo, há pequenas variações de permeabilidade e porosidade, sendo que o teor de pré-molhagem de 80% resulta em concretos menos porosos. Entretanto, nos concretos com AGRC e aditivo superplastificante, o menor teor de pré-molhagem testado (40%) se revela a melhor opção, pois a água de mistura é absorvida pelos poros vazios do agregado reciclado, o que diminui a porosidade da argamassa, e conseqüentemente a capilaridade do concreto.

Palavras-chave: agregado reciclado de concreto; pré-molhagem; trabalhabilidade; resistência à compressão, permeabilidade.

ABSTRACT

PADOVAN, R. G. **Influence of pre-wetting on properties of concrete produced with recycled concrete aggregate.** São Leopoldo, 2013. 155p. Dissertação (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

Recycled aggregates have high water absorption properties due to its high porosity. It changes the water content of the mixtures, and has implications on the microstructural properties of cement-based materials as those who uses recycled aggregate; however, little is known about these materials. This research has the objective of determining the influence of aggregate pre-wetting in new concrete made with recycled coarse aggregate concrete (RCAC) replacing natural aggregate. The substitution ratio of natural coarse aggregate (NCA) in relation to RCAC was 50% relative to the volume of the concrete. Prior to employing RCAC, it was pre-wetted with pre-wetting levels of 40, 60, 80 and 100% of the total water absorption of the residue. Water to cement ratios were initially determined to be 0.45, 0.55 and 0.65. The slump was set at 100 ± 20 mm, performing a compensation on the water content of the mixture required to get this slump. In a second group, the smallest amount of water used in the concrete's production without additive was set with saturation levels of 40, 60 and 80%, using a superplasticizer instead of water to achieve the required slump. The recycled concrete produced was found to influence the pre-wetting RCAC on the properties of fresh concrete, through determination of consistency over time, compressive strength and durability and water absorption by capillarity. Mortar samples were obtained from the extraction of recycled concrete. These samples were analyzed for porosity. The results indicate that the workability and the compressive strength of concretes with AGRC are little influenced by the amount of pre-wetting, while the water permeability and the void content of the mixture existing in the mortar suffer significant influence: in the concrete with no additive AGRC there are small variations in porosity and permeability, and in the amount of pre-wetting results in 80% less porous concrete. However, in concrete with AGRC and superplasticizer, the lowest level of pre-wetting tested (40%) proves the best option, because the mixing water is absorbed by the empty pores of recycled aggregate, which reduces the porosity of the mortar, and consequently the capillarity of hard concrete.

Key-words: Recycled concrete aggregate, Pre-wetting, Workability, Compressive strength, Permeability.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem vivido, nos últimos anos, um período de amplo desenvolvimento, resultando em um aumento dos lucros, na valorização de seus profissionais e na expansão do mercado. Entretanto, como qualquer outro setor, a construção civil deve estar atenta às demandas da sociedade na qual está inserida, que exige constante inovação e renovação de seus processos e técnicas, de acordo com os novos conceitos relacionados à humanidade, um destes a sustentabilidade. A sustentabilidade na construção civil é atualmente um tema em evidência, tendo em vista que a indústria da construção causa um considerável impacto ambiental ao longo de toda a sua cadeia produtiva, e o uso de materiais em larga escala na construção civil também contribui para aumentar a escassez dos recursos não renováveis, além da liberação de um alto nível de CO₂ na atmosfera.

Desenvolvimento sustentável é definido por Valle (2004) como o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro. Ou seja, é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual sem prejudicar a capacidade das gerações posteriores de atenderem as suas próprias necessidades. A concepção de construção sustentável incorpora práticas de projeto, construção e operação do empreendimento que reduzem expressivamente ou mesmo extinguem o impacto negativo provocado ao meio ambiente. O ciclo de vida das edificações envolve a exploração de recursos naturais, a produção dos materiais, construção, uso, demolição e reciclagem ou gerenciamento dos resíduos (CARVALHO, 2002). Sendo assim, é importante a conexão entre estas etapas para que o conceito de sustentabilidade na construção civil seja corretamente aplicado e então os impactos ambientais possam ser reduzidos.

Enquanto em países europeus a aplicação significativa do resíduo de construção e demolição foi registrada após o final da 2^o Guerra Mundial, visando suprir a demanda por agregados na reconstrução das cidades, no Brasil, o primeiro estudo sistematizado para a utilização de resíduos de construção e demolição foi realizado pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto, em 1986. Sua pesquisa teve como objetivo estudar o uso de material reciclado para a produção de argamassas (PINTO, 1986). Desde então diversas pesquisas tiveram início nas universidades nacionais (ZORDAN, 1997; LEITE, 2001; ANGULO, 2005; CABRAL, 2007; LOVATO, 2007; TROIAN, 2010; WERLE, 2010; CAVALHEIRO, 2011; GONÇALVES, 2011; entre outros) em busca de melhor entendimento sobre o comportamento deste material.

Em países como Japão e Alemanha, pesquisas sobre a utilização de resíduos de concreto tiveram início no final da década de 80, e embora atualmente diversas pesquisas envolvendo a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) venham sendo desenvolvidas no Brasil, este tema ainda apresenta inúmeros questionamentos tanto em nível nacional quanto internacional. Muitos autores concordam que a utilização de agregados reciclados para a produção de concretos estruturais deve ser testada, desenvolvendo-se novas tecnologias para a reciclagem desse material (POON et al., 2004; TAM et al., 2005; LI, 2009; BENETTI, 2012; FEDUMENTI, 2013 entre outros). A reciclagem vem crescendo e se consolidando nos países desenvolvidos nas últimas décadas, e isso se deve ao fato do desenvolvimento da consciência pública sobre questões ambientais e do interesse compartilhado em relação à conservação de recursos naturais, minimização de resíduos e busca por uma adequada disposição final aos mesmos. Para as empresas do segmento da construção civil, a reciclagem torna-se uma oportunidade de transformação de uma fonte de despesa (através da disposição e transporte dos resíduos gerados) em uma fonte de receita, ou pelo menos, de redução destas despesas para a empresa geradora dos resíduos (CAVALHEIRO, 2011).

A composição dos RCD originados em cada atividade da construção civil é distinta em cada país, em função da diversidade das tecnologias construtivas utilizadas, além da cultura construtiva de cada país. A madeira é bastante presente na construção americana e japonesa, possuindo presença menos expressiva na construção europeia e brasileira (PINTO, 1999). Os teores de materiais presentes nos RCD variam entre canteiros de obra e entre países. De acordo com Lovato (2007), os RCD podem ser compostos por diferentes materiais, como solos, rochas naturais, concretos, argamassas (de assentamento ou revestimento), cerâmicas de revestimentos, cimento-amianto, gesso, vidro, aço, madeira, plásticos, materiais betuminosos, tintas, papel de embalagem e restos de vegetais. A composição destes resíduos varia de acordo com a fonte que os originou, com o momento em que a amostra foi coletada e o tipo de construção em que foi utilizado.

Bjegovic et al. (2010) afirmam que são gerados anualmente mais de 1 bilhão de toneladas de resíduos de construção e demolição que são descartados em aterros sanitários pelo mundo inteiro. Estes resíduos são provenientes de construções de novas edificações, ampliações, reformas ou de demolições, além de resíduos de construção de infraestrutura urbana. No Brasil, os resíduos de construção e demolição correspondem a 50% do total de resíduos sólidos urbanos, sendo que este valor é estimado em 61% na região sudeste do país

(CABRAL et al., 2007), embora atualmente exista uma expectativa muito maior de geração de RCD, devido ao fato de o setor da construção civil se encontrar em um momento muito favorável, conforme indica a Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil (CBIC, 2011), que para o ano de 2010, estimou que o Produto Interno Bruto (PIB) cresceu em torno de 11% para o setor da construção civil.

Embora a preocupação com os RCD ainda seja recente no Brasil quando comparada ao panorama europeu, a reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando ao longo dos anos como um exercício relevante para a sustentabilidade, seja reduzindo o impacto ambiental provocado pelo setor ou minimizando os valores despendidos. As questões ambientais têm ocupado, gradativamente, cada vez mais espaço nos problemas dos países, desenvolvidos ou não, e a quantidade de resíduos deixados por construções tornou-se um dos centros de discussões da sustentabilidade.

Assim como qualquer atividade, Angulo et al. (2003) descrevem que a reciclagem de resíduos também pode produzir impactos ao meio ambiente. Isso significa que o tipo de resíduo, a tecnologia aplicada e o uso proposto para o material reciclado podem tornar a ação de reciclagem ainda mais impactante do que o próprio resíduo antes de ser reciclado. Ou seja, os riscos ambientais apresentados através do procedimento envolvido na reciclagem necessitam ser corretamente gerenciados. Sendo assim, a seleção da reciclagem de um resíduo deve ser criteriosa e considerar todas as alternativas existentes com relação à utilização de energia e matéria-prima através do processo de reciclagem selecionado.

Carvalho (2002) afirma que é importante também ponderar os resíduos gerados pelos materiais reciclados ao final de sua vida útil e a possibilidade de serem novamente reciclados – concluindo assim o ciclo de vida das construções. Os autores McDonough e Braungart (2002) introduzem o conceito “Berço ao Berço”, afirmando que apenas a minimização dos danos causados ao meio ambiente não é o suficiente. Ao invés disso, os autores sugerem a modificação dos processos de criação, de modo que a reutilização e a inserção dos materiais pós-consumo sejam aferidos diretamente no processo de criação. A ideia dos autores é de avaliar todo o processo de produção, uso e descarte de uma maneira cíclica, onde não sejam produzidos resíduos, mas que cada etapa se insira dentro de um ciclo natural dos materiais que os compõem, imitando a natureza, onde nada se perde e tudo se transforma. Atualmente, este conceito é aceito tanto na Europa quanto nos Estados Unidos, e vem se difundindo de uma forma indireta no Brasil, através da Política Nacional de Resíduos

Sólidos (PNRS), aprovada em 2010, onde os fabricantes são parcialmente responsáveis pelo descarte pós-consumo de seus produtos.

Os resíduos de construção e demolição apresentam uma composição diversificada, compostos predominantemente de argamassa, concreto, material cerâmico e rocha. Esta heterogeneidade faz com que o material final (agregado reciclado beneficiado) apresente propriedades influenciadas por cada fase deste material. Neste aspecto, o resíduo de concreto (RC) apresenta-se como um material mais homogêneo e com maiores oportunidades de reciclagem em um material mais nobre. O processo de reciclagem mais indicado, tanto para os resíduos de concreto quanto para os RCD, é sua utilização sob a forma de agregado, seja na fração graúda ou miúda dos mesmos, e estes agregados podem ser inseridos em diferentes processos e para diversos fins, tais como: pavimentação, argamassas de revestimento ou na produção de novos concretos.

No caso dos resíduos de concreto, a reciclagem do material não se torna mais impactante que a disposição do resíduo, devido ao fato que não é necessário que este resíduo seja submetido a processos químicos que busquem modificá-lo para que seja possível a sua inserção em um novo concreto. Os resíduos de concreto, além de serem provenientes de construção e demolição de edificações, podem ser procedentes de empresas de pré-moldados e pré-fabricados ou gerados em concreteiras, e possuem características distintas de acordo com o sítio de onde são oriundos. Estes resíduos podem ser originados de diferentes fontes, como os concretos que foram dosados, fabricados e aplicados com um controle tecnológico; e concretos produzidos sem este controle de qualidade. O nível de resistência vai interferir diretamente na porosidade final do resíduo (OLIVEIRA e ASSIS, 1999).

Mehta e Monteiro (2008) relatam que o concreto de cimento Portland é o material manufaturado mais empregado no mundo. Devido a este fato, é imprescindível a incorporação cada vez maior de materiais alternativos na produção do concreto com a finalidade de preservar o meio ambiente. A durabilidade desses novos materiais possui ampla relevância, pois é esta que define a vida útil do novo concreto. Isaia (2011) cita que o concreto de cimento Portland revela-se mais sustentável que o aço e a madeira, no entanto, é o cimento que proporciona a maior parte do impacto relacionado a este material. O consumo médio de energia por tonelada de cimento produzido no país é de aproximadamente 107 KW/h e emite em torno de 610 kg de CO₂ através da utilização de adições misturadas ao clínquer (CIMENTO.ORG, 2012). No ano de 2011, foi registrado um novo recorde no consumo de

cimento do país, sendo produzidas cerca de 65 milhões de toneladas do produto (SNIC, 2011).

A alternativa de produzir concreto com incorporação de resíduos é uma solução que vem sendo amplamente investigada, e sua viabilidade técnica já foi comprovada em diversas pesquisas. O Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Unisinos vem desenvolvendo pesquisas sobre a utilização de agregados reciclados, e vem oferecendo um destaque particular para os resíduos de concreto através da elaboração de concretos com a incorporação de agregados reciclados nas pesquisas desenvolvidas (TROIAN, 2010; WERLE, 2010; CAVALHEIRO 2010; GONÇALVES, 2011), comprovando a viabilidade do uso de agregado reciclado de concreto em teores de substituição do agregado natural em até 50%.

1.1 JUSTIFICATIVA

A construção civil é um dos segmentos que mais consome recursos naturais, além de ser responsável pela liberação de vasta quantia de resíduos no meio ambiente, e em função do crescimento do setor, a situação tende a se agravar. No ano de 2011, os municípios brasileiros coletaram mais de 33 milhões de toneladas de RCD, 7,2% a mais do que o país gerou em 2010, de acordo com dados do relatório anual elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012).

Pesquisas de âmbito nacional e internacional têm comprovado, ao longo dos anos, a viabilidade do uso de agregado reciclado de concreto em substituição ao agregado natural na produção de argamassas e concretos. Porém, o modo como este material deve ser incorporado às misturas ainda possui discordâncias. Embora o agregado reciclado de concreto possua menor variabilidade e menor incidência de contaminação, apresenta maior porosidade e menor massa específica que os agregados convencionais. De uma maneira geral, os concretos produzidos com agregado reciclado de concreto (quando estes são adicionados às misturas secas ou com baixo teor de umidade) apresentam uma menor trabalhabilidade em relação aos concretos produzidos com agregados naturais, e isto ocorre devido à maior capacidade de absorção de água, característica dos agregados reciclados.

Como forma de minimizar o efeito sobre a perda da trabalhabilidade dos concretos produzidos com ARC e suas consequências em relação ao desempenho destes concretos, as pesquisas desenvolvidas por Ferreira (2007), Werle (2010) e Troian (2010) apresentam diferentes métodos de compensação da elevada taxa de absorção de água do ARC.

Porém, ainda existem divergências em relação aos métodos empregados e ao próprio tema. Com base nestes aspectos, é necessário ampliar os conhecimentos sobre questões relativas à pré-molhagem do agregado reciclado e sua influência nas propriedades dos concretos produzidos, em busca de respostas que contribuam para o avanço das pesquisas em relação ao assunto.

Esta proposta insere-se em um amplo trabalho de pesquisas em desenvolvimento no PPGEC – Unisinos, realizado pelo GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem. O organograma de pesquisas do grupo pode ser visualizado na Figura 1.

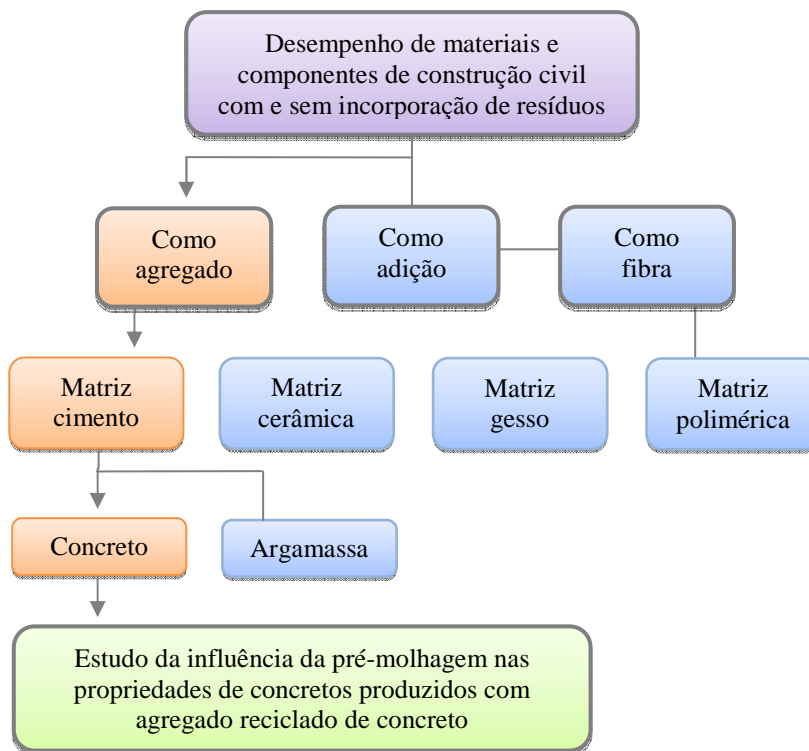


Figura 1 – Organograma de atividades de pesquisa do GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem, onde se insere este trabalho.

Dentro do contexto das pesquisas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Unisinos, este trabalho é parte integrante do projeto de pesquisa PRÓ-ENGENHARIAS/CAPES N°01/2007, que consiste em um projeto desenvolvido em rede de cooperação de pesquisa entre os programas de Pós-Graduação na área de Engenharia Civil entre as universidades: UFRGS, UEFS, UFPA e Unisinos, e pretende investigar os parâmetros de controle da variabilidade dos agregados de resíduos de construção e demolição, de modo a desenvolver materiais de baixo impacto ambiental para aplicação na habitação. A pesquisa

possui o objetivo de determinar as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de concretos desenvolvidos com agregados reciclados. O estudo das propriedades dos concretos com RCD vem sendo precedido do estudo de métodos de pré-tratamento dos resíduos antes da produção do concreto, bem como os parâmetros de controle para o seu emprego na produção de novos materiais.

Este trabalho possui como foco o emprego de diferentes níveis de pré-molhagem do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), contribuindo para esclarecer questionamentos em relação ao processo de pré-molhagem do ARC e sua influência sobre a trabalhabilidade do concreto fresco e no desempenho dos concretos produzidos.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa são apresentados na sequência:

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral determinar a influência de diferentes níveis de pré-molhagem do agregado reciclado no comportamento de concretos, quando utilizado agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) em substituição ao agregado graúdo natural.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Verificar a influência dos teores de pré-molhagem dos AGRC que substituem os agregados graúdos naturais, sobre a trabalhabilidade do concreto fresco e sobre a absorção de água e resistência à compressão de concretos produzidos com este tipo de agregado;
- Verificar a influência dos teores de água (água de mistura + água proveniente da pré-molhagem dos AGRC) na trabalhabilidade do concreto fresco e na absorção de água e resistência à compressão de concretos produzidos com este tipo de agregado;
- Identificar alterações na porosidade das argamassas extraídas dos concretos produzidos com agregados reciclados de concreto inseridos na mistura com teores de pré-molhagem de 40, 60, 80 e 100%.
- Verificar a influência do uso de aditivo nas propriedades de concretos onde é utilizada a pré-molhagem de AGRC.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa compreende cinco capítulos. No presente capítulo estão descritos a importância e os objetivos do tema.

No segundo capítulo está inserida a revisão bibliográfica, a qual abrange assuntos associados ao tema da pesquisa, com ênfase no agregado reciclado de concreto e algumas de suas propriedades, condições de umidade do ARC, formas de inserção de água nas misturas de concretos produzidos com agregados reciclados, assim como propriedades destes concretos.

O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada no presente trabalho. Neste está detalhado o delineamento do programa experimental da pesquisa, os métodos adotados para a realização dos ensaios nos concretos produzidos e argamassas extraídas dos mesmos, assim como o projeto estatístico definido para o experimento.

O quarto capítulo engloba a apresentação, análise e a discussão dos resultados dos ensaios das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido, assim como os resultados da investigação da porosidade das argamassas extraídas dos concretos produzidos.

No quinto e último capítulo é realizada a conclusão desta pesquisa e são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Após definidos o objeto de estudo e os objetivos da pesquisa, foram delineadas as limitações do trabalho. Diversos são os fatores que exercem influência sobre o desempenho dos concretos produzidos com agregados reciclados. O tipo de cimento e agregados utilizados, o teor de substituição, a relação água/cimento e os métodos de pré-molhagem e de mistura adotados são alguns destes fatores. Considerando-se a impossibilidade de avaliação do grau de intervenção de cada um dos fatores, foram estabelecidos limites ao programa experimental proposto. Destacando-se:

Tipo de cimento: devido ao objetivo geral desta pesquisa estar designado a analisar e compreender a influência do processo de pré-molhagem no comportamento de concretos quando utilizado agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) em substituição ao agregado natural; optou-se pela utilização de apenas um tipo de cimento, o CPV-ARI, o qual possui uma quantidade insignificante de adições, além de proporcionar um rápido grau de hidratação.

Tipo de agregado graúdo: o agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) definido para a pesquisa é proveniente de resíduos procedentes de uma empresa de pré-fabricados localizada na região metropolitana de Porto Alegre, possui um F_{cj} de 35 MPa e foi curado termicamente. A opção pela utilização de resíduos de concreto provenientes de uma empresa de pré-fabricados incide sobre o fato de o que o resíduo gerado é homogêneo, característica desenvolvida devido ao controle de qualidade na produção deste concreto, além de não possuir contaminantes e ser produzido em uma quantidade relevante, a qual justifica sua reciclagem.

Percentual de substituição do agregado graúdo: o percentual de substituição do agregado graúdo natural por AGRC foi definido de acordo com pesquisas já realizadas no GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem da Unisinos sobre o assunto, como os estudos de Troian (2010) e Werle (2010).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Na revisão da literatura são abordados temas relacionados à pesquisa, como o ARC e algumas de suas propriedades, a sua considerável absorção de água e a influência da pré-molhagem do agregado reciclado nas características dos novos concretos produzidos são assuntos que possuem destaque nesta revisão.

2.1 AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC)

A ABNT NBR 15116:2004 define agregado reciclado como um material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura. Agregado de resíduo de concreto (ARC) é descrito por esta mesma norma como sendo o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A (resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados), composto em sua fração graúda por no mínimo 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland e rochas.

Os agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto são obtidos através da britagem de fragmentos de materiais minerais, provenientes da demolição de estruturas de concreto, assim como concretos frescos, endurecidos e rejeitados (LEVY, 2001). Segundo Buttler (2003), os resíduos de concreto contêm rejeitos da demolição de estruturas de concreto, resíduos de usinas de concreto pré-misturados, fábricas de elementos pré-moldados e de pavimentos de concretos, além dos resíduos de concreto de instituições de pesquisa que realizam estudos com este material. Estes agregados reciclados apresentam características muito particulares, as quais dependem muito dos materiais que chegam às centrais de reciclagem e do tipo de processo de beneficiamento utilizado para a produção do agregado. A forma de cominuição do material exerce grande influência em relação às propriedades do ARC, tais como a granulometria e forma e textura dos grãos, propriedades estas que afetam significativamente a massa específica e a resistência à compressão do concreto produzido com o agregado reciclado.

Pesquisas (TROIAN, 2010; WERLE, 2010) sugerem a viabilidade do emprego de ARC em teores de substituição do agregado natural de até 50%, evitando assim, que o concreto produzido com ARC não diminua expressivamente suas propriedades mecânicas quando comparado ao concreto produzido com agregado natural. A redução da resistência do concreto produzido com a utilização de ARC possui relação com o fato de que o agregado de concreto possui certa quantidade de argamassa aderida em torno do grão de brita natural, o

que torna o agregado reciclado mais poroso. Devido a este fato, a absorção de água do ARC é significativamente mais elevada em relação ao agregado natural. Malesev et al. (2010) afirmam que o fato do agregado de concreto possuir esta quantidade de argamassa aderida ao grão de brita natural resulta na perda de trabalhabilidade do concreto, tornando necessária a adição de determinada quantidade de água na mistura do concreto ou a pré-molhagem do agregado que será incorporado à mistura, buscando assim, manter a trabalhabilidade do concreto produzido com ARC igual a do concreto produzido com a utilização de agregado natural.

Os estudos em concreto demonstram que os agregados reciclados apresentam características bem distintas dos agregados convencionais, como por exemplo, menor massa específica, maior absorção de água e maior porosidade (JUAN e GUTIÉRREZ, 2009). De acordo com Tabsh e Abdelfatah (2009), um dos aspectos negativos para a utilização de ARC é a consequência do aumento do teor de água na relação água/cimento, ou a necessidade de utilização de aditivos para que este concreto obtenha o mesmo abatimento dos concretos convencionais, resultando assim em resistências inferiores quando comparadas a um concreto convencional. A absorção e a densidade são propriedades dos agregados reciclados que apresentam grande influência sobre a produção dos concretos, e conseqüentemente sobre suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade (TAM et al., 2005; LI et al., 2009).

Quando se analisa a incorporação de agregados reciclados na produção de concretos, características importantes em relação a estes agregados devem ser consideradas, tais como a composição granulométrica, forma e textura, sua porosidade e absorção de água, entre outras. A maior heterogeneidade, menor resistência em relação à matriz onde será inserido (situação que ocorre frequentemente) e maior porosidade do agregado reciclado de concreto em relação ao agregado natural, são consideradas as principais características que diferem estes materiais. O estudo do material reciclado e suas propriedades são considerados importantes, pois estas influenciam diretamente no comportamento do concreto, seja no estado fresco ou endurecido.

A seguir são avaliadas algumas propriedades dos agregados reciclados de concreto, as quais são fundamentais para a produção de concretos com agregados reciclados.

2.1.1 Composição granulométrica

Existem diversos motivos para a especificação de limites granulométricos e da dimensão máxima dos agregados, a mais importante delas é a influência na trabalhabilidade e

no custo. Areias muito finas, por exemplo, aumentam o consumo de água e consequentemente, o consumo de cimento para uma determinada relação água/cimento. Já a utilização de areias muito grossas, gera misturas de concreto mais ásperas e pouco trabalháveis (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A granulometria de partículas sólidas é definida como a determinação do tamanho das mesmas, bem como a frequência com que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de dimensão. A composição granulométrica dos agregados reciclados tende a ser um pouco mais grossa quando comparada aos agregados naturais, e através desta é conhecida a quantidade de finos existentes no material, que são oriundos da argamassa que se desprende do agregado natural.

A granulometria dos agregados exerce influência sobre a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, além de ser importante parâmetro para a dosagem das misturas (BARRA, 1996). Esta é uma característica importante do agregado, visto que exerce influência sobre a trabalhabilidade e resistência mecânica, assim como sobre o consumo de aglomerantes, absorção de água e fluência do concreto (TOPÇU e SENDEL, 2004).

Para Terzian (2005) a variabilidade na distribuição granulométrica, a forma e o teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados interferem significativamente na resistência do concreto, e devido a este fato, devem ser evitados agregados com formas lamelares ou alongadas, pois estes possuem pó aderido à superfície, causando assim, o aumento do consumo de água da mistura. É importante destacar que, quanto maior for o tamanho do grão, mais provável é a existência de argamassa aderida a este, ou seja, o tamanho da partícula do agregado exerce influência nos concretos produzidos, pois a argamassa aderida contribuirá para uma ligação mais frágil.

2.1.2 Forma e textura das partículas

A forma e a textura dos grãos exercem uma influência significativa na produção de concretos, sobretudo nas propriedades que possuem relação com a quantidade de água de amassamento necessária à mistura, como a trabalhabilidade (COUTINHO, 2006). Mehta e Monteiro (2008) citam que a forma e a textura superficial dos agregados são características que exercem maior influência sobre as propriedades do concreto no estado fresco do que sobre as propriedades do estado endurecido.

De acordo com Tristão (2005 apud ARNOLD, 2011) as frações granulométricas e a forma dos grãos estão associadas ao empacotamento das partículas. Coutinho (2000) cita

que o conhecimento da forma dos grãos torna-se importante, visto que este exerce influência sobre seu modo de disposição, o qual conseqüentemente refletirá na consistência e compacidade do concreto produzido através da incorporação de agregados reciclados.

É consenso que o tipo de britador escolhido para o beneficiamento do material exerce influência sobre a forma do grão e características dos agregados reciclados. De acordo com Nunes (2007) os britadores de mandíbulas formam partículas de formas mais angulares, enquanto que os britadores giratórios produzem partículas mais arredondadas. Os agregados reciclados são geralmente mais irregulares e angulares; e possuem texturas mais ásperas e rugosas que os agregados naturais (ANGULO, 2000; LEITE, 2001; PEDROZO, 2008).

A forma do grão é avaliada, segundo a norma ABNT NBR 7211:2009, a partir de um índice denominado índice de forma de agregados, o qual, segundo a norma, para o uso em concreto não deve ser superior a 3. De uma maneira geral os agregados reciclados atendem a este requisito.

A textura dos agregados reciclados é geralmente mais rugosa e porosa do que a dos agregados naturais, e a argamassa aderida às partículas do material confere ao agregado reciclado tal aspereza. Quando comparado ao agregado natural, o material reciclado ocasiona uma maior absorção da pasta de cimento através de seus poros superficiais. E de acordo com Leite (2001), esta ocorrência pode proporcionar uma maior precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado, permitindo assim, um maior fechamento da zona de transição do concreto, transformando a matriz e o agregado em um bloco único de material, o que pode resultar em uma melhoria no desempenho final do concreto. Porém, é importante destacar que, quando o agregado reciclado é incorporado ao concreto, a elevada porosidade do agregado reciclado faz com que a mistura se torne muito mais coesa e em consequência disto, menos trabalhável quando comparada a uma mistura que contenha agregado natural. O acréscimo de água necessário para compensar esta perda de trabalhabilidade pode levar a uma perda de propriedades mecânicas.

2.1.3 Massa unitária e massa específica

A massa unitária é obtida pela divisão entre a massa das partículas de agregado que ocupam uma unidade de volume, e o volume ocupado por ambos agregados e vazios. A ABNT NBR 45:2006 determina massa unitária como a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente de acordo com o estabelecido na própria norma e o volume desse recipiente.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) para a determinação de dosagens é imprescindível avaliar o espaço ocupado pelas frações de agregado, abrangendo os poros existentes no interior das partículas, através de uma unidade de volume. Esta relação, que considera o volume de material sólido, excluindo todos os poros é conhecida como massa específica. A norma ABNT NBR NM 52:2009 define massa específica como a relação entre a massa do agregado e seco e seu volume, excluindo-se os vazios e poros permeáveis.

Brito (2005) cita que a argamassa aderida ao agregado reciclado de concreto possui uma densidade significativamente menor que a dos agregados naturais originais devido à pasta que compõe a argamassa, e quanto maior a quantidade de argamassa aderida no agregado natural, menor será a massa específica do agregado reciclado. O conhecimento da massa específica dos agregados reciclados concreto se torna relevante, pois um agregado reciclado que possua uma baixa massa específica, devido a uma maior presença de vazios, ou seja, uma maior porosidade do agregado em relação à argamassa aderida, não será adequada para a produção de um concreto com alta resistência.

É aconselhável ter conhecimento da massa unitária e massa específica dos agregados previamente à realização de um estudo de dosagem em concretos. Através dos resultados obtidos com estes ensaios, pode-se concluir que existe a necessidade de se efetuar uma compensação da quantidade de material reciclado que será utilizado nas misturas de concreto, quando para a execução destes concretos, são efetuadas substituições de um agregado natural por outro reciclado, que possui uma massa específica diferente. Se não for realizada uma substituição em igualdade de volume, será gerada uma distorção entre volumes de concreto convencional e reciclado que são executados a partir de um mesmo traço. O que irá alterar o traço original e impedir uma comparação entre os dois traços (original e com agregado reciclado).

É consenso que tanto a massa unitária como a massa específica dos agregados reciclados geralmente apresentam valores um pouco menores que os apresentados pelos agregados naturais usualmente utilizados na produção de concretos. A procedência do concreto que origina os agregados possui influência no valor da massa específica, e o valor desta, geralmente é menor que o valor da massa específica dos agregados naturais, em consequência da existência da argamassa antiga aderida às partículas do agregado reciclado de concreto.

A Tabela 1 apresenta um resumo do levantamento bibliográfico relativo à massa unitária e massa específica de agregados reciclados de concreto em função de suas frações granulométricas.

Tabela 1 – Levantamento bibliográfico relativo à massa unitária e massa específica dos agregados reciclados de concreto.

Autor	Fração granulométrica (mm)	Massa unitária (kg/dm³)	Massa específica (kg/dm³)
Buttler (2003)	0 - 19	1,25 - 1,29	2,39 - 2,45
Topçu e Sengel (2004)	-	1,16	2,47
Xiao et al. (2005)	5 - 31,5	1,29	2,52
Cabral (2007)	0 - 20	1,22	2,27
Gomes (2007)	1 - 38	1,30	2,52
Abbas et al. (2009)	4,75 - 9,5	2,31	2,64
		2,42	2,64
Berndt (2009)	12,7 - 19	2,31	2,59
	19 - 25,4	2,36	2,61
Domingo-Cabo et al. (2009)	4 - 20	-	2,60
Limbachiya (2010)	5 - 20	2,26 - 2,29	2,54 - 2,59
Werle (2010); Troian (2010)	4,75 - 25	1,21	2,47 - 2,50
Gonçalves (2011)	4,75 - 19	1,07 - 1,16	2,33 - 2,37

É possível justificar a dispersão apresentada entre os resultados através da diferença de massa específica e unitária dos agregados naturais que constituem os agregados reciclados e da porosidade da argamassa aderida. De um modo geral, a massa unitária e a massa específica dos agregados reciclados estarão condicionadas à matriz do cimento (CABRAL, 2007).

2.1.4 Absorção de água e porosidade do ARC

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a argamassa aderida ao agregado reciclado de concreto exerce forte influência na absorção de água do novo concreto produzido. O principal fator que difere os agregados reciclados de concreto dos agregados naturais é o fato de serem compostos por materiais de naturezas diferentes. Os agregados reciclados de concreto são compostos por: agregado natural e argamassa de cimento anteriormente aderida a ele. A argamassa aderida ao agregado reciclado de concreto ocasiona queda de desempenho do concreto produzido com o ARC, seja no estado fresco ou no estado endurecido.

Em seus estudos, Juan e Gutiérrez (2004) analisaram a influência da quantidade de argamassa aderida ao agregado natural nas propriedades de agregados reciclados de concreto, e constataram que a porosidade da argamassa aderida exerce influência negativa nas propriedades dos agregados reciclados. Os autores ainda citam que, quanto maior for a quantidade de argamassa aderida, menor será a densidade do agregado, e como consequência disto, maior será a sua absorção de água. Os autores recomendam uma quantidade limite ideal de argamassa aderida ao agregado natural de 44%. Amorim (2008) verificou um volume maior de argamassa aderido às menores frações granulométricas de agregado, concluindo assim que quanto menor for a fração granulométrica, maior será o volume de argamassa aderida ao agregado natural, ou seja, a quantidade de argamassa aderida está relacionada à dimensão dos agregados.

A grande capacidade que os agregados reciclados possuem de absorver água das misturas representa uma das principais diferenças entre estes e os agregados naturais. No caso dos agregados reciclados, além de absorverem grande quantidade de água, isto ocorre de forma extremamente acelerada. Etxeberria (2004) associa a absorção de água dos agregados reciclados a três fatores principais, que são: a dimensão das partículas, a quantidade de argamassa aderida e a massa específica dos mesmos. Para López-Gayarre et al. (2009) a elevada absorção de água do ARC em relação ao agregado natural impossibilita que a relação água/cimento do concreto original seja mantida na execução do mesmo traço, porém com o uso de agregado reciclado. A utilização de aditivos também é indicada como alternativa para compensar esta perda da trabalhabilidade dos concretos.

A absorção de água está diretamente ligada à porosidade dos agregados, sendo estes, capazes de reter uma quantidade de água nos poros, em relação à massa seca do material, e sua determinação pode ser considerada como uma quantificação indireta da porosidade, da resistência mecânica e da durabilidade dos concretos produzidos (DAMINELI, 2007). Diversos autores constatam a elevada absorção de água dos agregados reciclados e afirmam que isto se deve a camada de argamassa aderida às partículas, no caso do agregado reciclado de concreto. Ferreira (2007) verificou em seu trabalho que os agregados reciclados de concreto absorvem aos 5 minutos, cerca de 90% da sua capacidade total de absorção. E a após 5 minutos de imersão em água, o progresso da absorção torna-se extremamente lento e pouco significativo, conforme apresenta a Figura 2.

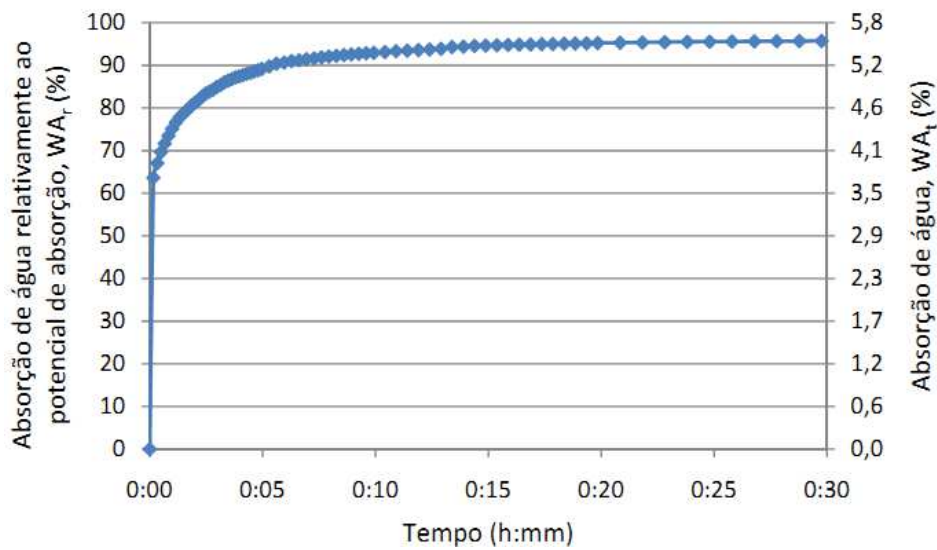


Figura 2 – Ensaio de absorção de água ao longo do tempo em agregado graúdo reciclado de concreto.

Fonte: Ferreira (2007).

Werle (2010) também verificou que os agregados reciclados de concreto possuem uma elevada absorção de água durante os primeiros minutos de imersão, e que esta absorção torna-se lenta ao longo do tempo. Em seu estudo, a autora também analisou a absorção de água do agregado natural, a qual se apresenta muito menor quando comparada ao ARC, conforme apresenta a Figura 3 e Figura 4. Observa-se nos gráficos que o percentual de absorção para as frações de ARC, é bastante elevado nos primeiros 10 minutos, e não varia muito do intervalo dos 10 minutos para os 30 minutos, aumentando lentamente ao longo de todo o período de ensaio.

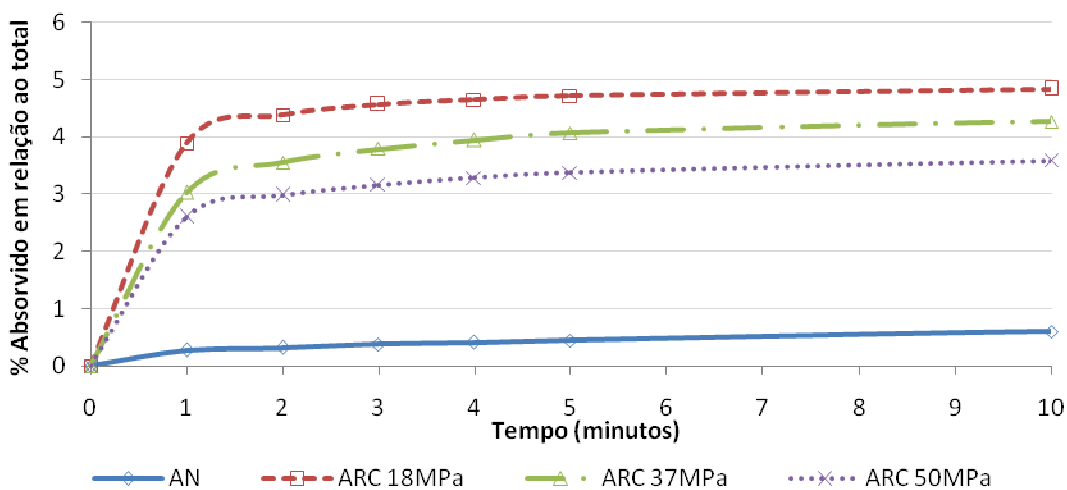


Figura 3 – Ensaio de absorção por imersão do ARC e AN nos minutos iniciais.

Fonte: Werle (2010).

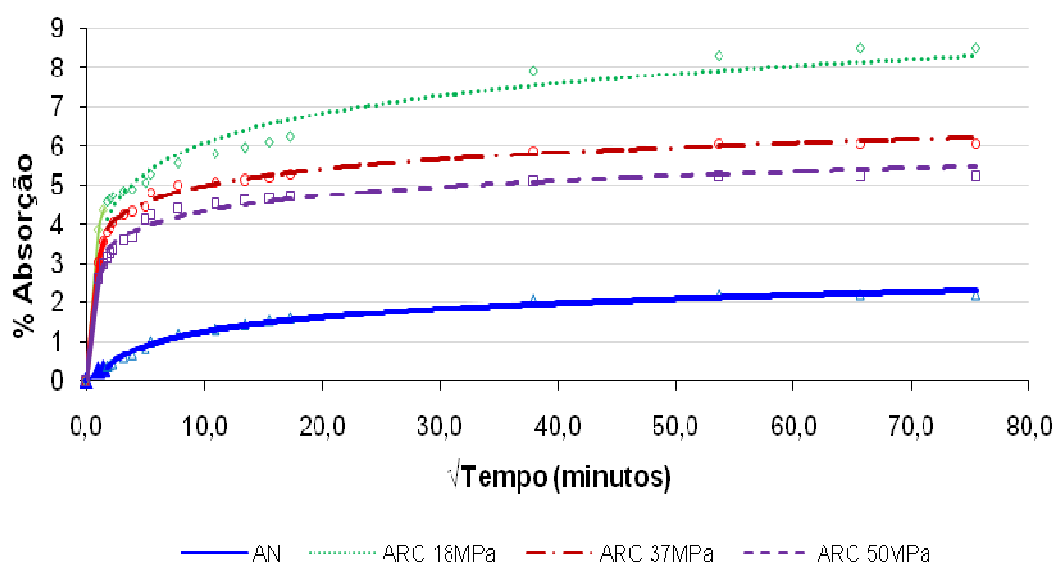


Figura 4 – Ensaio de absorção por imersão dos ARC e AN ao longo do tempo.

Fonte: Werle (2010).

Em seu estudo, Gonçalves (2011) analisou a absorção de água para diferentes agregados reciclados de concreto e os gráficos com a porcentagem de absorção de água em relação ao peso inicial da amostra ao longo do tempo podem ser visualizados na Figura 5 onde, ao comparar o agregado reciclado de concreto com o AGN, a autora constatou que o percentual de água absorvido pelo ARC é muito superior ao percentual absorvido pelo AGN. Para os agregados reciclados de concreto, verifica-se que a maior absorção de água ocorre durante os primeiros 10 minutos de ensaio, sendo mais intensa durante os 5 minutos iniciais de imersão em água e pouco significativa a partir deste momento.

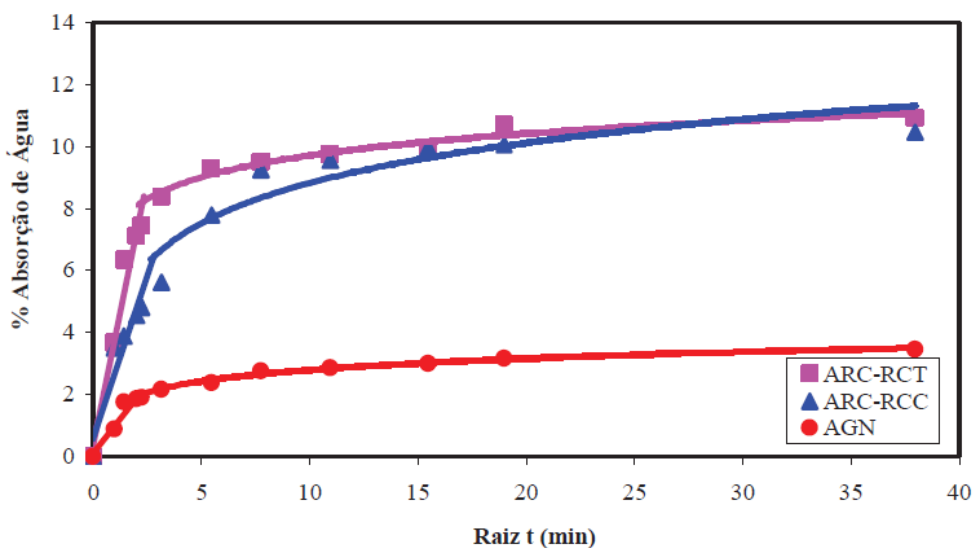


Figura 5 – Absorção de água dos agregados reciclados (ARC-RCT e ARC-RCC) e AGN.

Fonte: Gonçalves (2011).

A absorção de água do agregado reciclado exerce uma influência relevante sobre as propriedades do novo concreto produzido, e um aspecto em relação à absorção de água do ARC que deve ser observado é a velocidade com a qual a absorção de água acontece. Geralmente, a taxa de absorção durante os minutos iniciais de imersão em água é muito intensa e pode se manter alta até os primeiros 30 minutos, quando a partir deste período, torna-se bastante lenta e pouco significativa, até o momento da saturação total dos agregados.

O conhecimento da absorção de água do ARC é importante para que se estabeleçam diretrizes para a compensação da absorção de água do material para a execução dos traços de concreto com agregado reciclado. Usualmente, a quantidade de água utilizada para esta compensação é estipulada de acordo com o percentual total de absorção equivalente a cada tipo de agregado reciclado, e a velocidade inicial de absorção do mesmo, que pode atingir até 90% do seu potencial de absorção nos primeiros 5 minutos de imersão em água. Esta constatação leva alguns pesquisadores, a exemplo de Ferreira (2007) a fixar este tempo, como o necessário para a pré-molhagem do agregado reciclado, considerando que a partir deste período a absorção de água do agregado reciclado seja insignificante. Werle (2010) e Troian (2010) estabeleceram que os agregados reciclados teriam suas taxas de absorção compensadas e que o material seria pré-molhado nos 10 minutos antecedentes ao início da mistura dos materiais na betoneira para a produção do novo concreto.

Na Tabela 2 encontra-se o resumo dos dados de absorção do agregado reciclado de concreto e agregado natural, coletados durante a pesquisa bibliográfica.

Tabela 2 – Levantamento bibliográfico relativo à absorção de água dos agregados reciclados.

Autor	Fração granulométrica ARC (mm)	Absorção de água ARC (%)	Fração granulométrica AN (mm)	Absorção de água AN (%)
Levy (2001)	9,5 - 25	3,7 - 5,6	9,5 - 25	0,8
Buttler (2003)	0 - 19	4,74 - 6,25	0 - 19	1,96
Xiao et al. (2005)	5 - 31,5	9,25	5 - 31,5	0,4
Cabral (2007)	0 - 20	5,65	0 - 20	1,22
Ferreira (2007)	-	5,8	-	1,2
Kou et al. (2008)	10 - 20	3,52 - 4,26	10 - 20	1,11 - 1,12
Berndt (2009)	12,7 - 19	4,7	6,35 - 12,7	0,6
	19 - 25,4	4,1		
Domingo-Cabo et al. (2009)	4 - 20	5,19	4 - 10	1,42
			10 - 20	0,98
Fonseca (2009)	4 - 31,5	6,1	-	-
Padmini et al. (2009)	10	4,6 - 5,0	10	0,3
	20	3,65 - 4,86	20	0,3
	40	2,2 - 2,8	40	0,3
Cabral et al. (2010)	-	5,65	-	1,22
Limbachiya (2010)	5 - 20	4,8 - 5,5	5 - 20	1,2
Werle (2010); Troian (2010)	4,8 - 25	7,93 - 5,88 - 5,14	4,8 - 25	2,07

Os resultados apresentados na Tabela 2 demonstram que a absorção de água dos agregados reciclados é maior que a dos agregados naturais, e que há grande variação nos valores encontrados na bibliografia relativos à absorção de água do ARC. Esta diferença pode apresentar-se por diferentes fatores, entre eles estão a variação da granulometria do agregado reciclado, a forma de cominuição e o tempo de estocagem do mesmo, além da camada de argamassa antiga aderida que estes agregados possuem.

2.1.5 Argamassa aderida ao ARC

A elevada capacidade de absorção de água do agregado reciclado resulta da alta porosidade característica deste agregado, a qual é oriunda da grande quantidade de argamassa aderida ao agregado graúdo natural. O ARC usualmente apresenta uma grande quantidade de argamassa aderida ao agregado natural, além de fragmentos soltos de argamassa. Este fato possui influência sobre as características físicas e mecânicas do agregado e dos concretos produzidos através dele, e quanto maior a quantidade de argamassa aderida ao agregado, maior será a influência deste fato sobre suas propriedades. O conhecimento da quantidade de

argamassa aderida ao AGRC torna-se então importante para entender melhor a influência da absorção de água nas propriedades dos concretos produzidos com agregado reciclado.

Entende-se por argamassa aderida, a argamassa originada através da mistura de cimento, água e agregados miúdos, que se encontra aderida ao agregado natural graúdo, compondo assim, o ARC. Esta argamassa é responsável pela maior porosidade apresentada pelo ARC, sendo esta a principal característica diferencial entre AGN e ARC. A argamassa aderida é o fator responsável por alterações na massa específica e na absorção de água dos agregados, além de outras características. Também influencia nas características do concreto reciclado produzido, e esta influência depende de suas características e da quantidade de argamassa aderida (BRITO, 2005). Na Tabela 3 é apresentado um resumo do levantamento bibliográfico em relação à porcentagem de argamassa aderida para diferentes frações granulométricas de ARC.

Tabela 3 – Levantamento bibliográfico relativo à porcentagem de argamassa aderida para diferentes frações granulométrica de ARC.

Autor	Fração granulométrica (mm)	Argamassa aderida (%)
Sanchez (2004)	4 - 8	32,6 - 54,6
	8 - 16	23,4 - 44,4
	4 - 16	27,2 - 45,4
Etxeberria et al. (2007)	4 - 10	40
	10 - 25	20
Ferreira (2007)	-	69,4
Domingo-Cabo et al. (2009)	4 - 8	31,5
	8 - 20	18
Butler et al. (2011)	4,75 - 9,5	20 - 32
		30 - 41
		46 - 56
Heineck (2012)	4,8	90
		88

A estrutura do ARC é muito mais complexa do que a de um agregado graúdo natural. Tam et al. (2005) enfatizam que o ARC possui duas zonas de transição, as quais os autores definem como ZT's, uma entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento (nomeada de nova zona de transição) e outra entre o agregado reciclado e a argamassa anterior aderida (nomeada de antiga zona de transição), os quais estão esquematicamente

apresentados na Figura 6. Estas zonas de transição desempenham um papel crítico, pois o vínculo entre estes dois componentes determina o desempenho mecânico do concreto. Embora estas zonas de transição sejam bastante estreitas, elas ocupam uma porção relativamente grande da pasta de cimento.

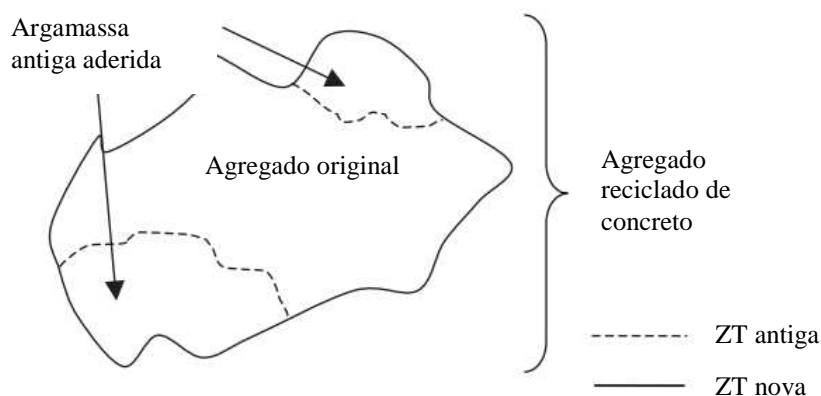


Figura 6 – Interfaces do agregado reciclado de concreto.

Adaptado de: Tam et al. (2005).

Esta argamassa formada por restos de cimento na zona de transição do ARC forma um elo fraco no mesmo, o qual é composto por muitos poros e fendas, e estes afetam negativamente a resistência final do ARC. São estes poros e fendas que ocasionam o maior consumo de água, conduzindo uma menor quantidade de água para a hidratação na zona de transição do ARC (TAM et al., 2005).

Alguns autores mencionam que a água absorvida pelo agregado reciclado permanece disponível para a promoção da hidratação do cimento em idades avançadas. Ou seja, o agregado reciclado promove a cura úmida interna da matriz do cimento e melhora a zona de transição (BARRA, 1996; KOHNO et al., 1999; TEGGUER, 2012). Por outro lado, há quem defenda que ao absorver água, o agregado reciclado reduz a quantidade de água na zona de transição, prejudicando a hidratação nessa região.

2.2 TEOR DE UMIDADE DO ARC E FORMAS DE COMPENSAÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água característica dos agregados naturais (geralmente inferior a 2%, como pode ser visualizado na Tabela 2), não exerce quase nenhum tipo de influência nas misturas de concreto, devido a estes agregados apresentarem pouca ou nenhuma porosidade. Porém, a já referida maior absorção de água do ARC frente ao AGN, afeta as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Em busca de minimizar este efeito de absorção de

água e a consequente perda da trabalhabilidade e alteração na relação água/cimento efetiva dos concretos produzidos com ARC, não é recomendado adicionar os agregados secos ou com baixo teor de umidade às misturas, e para isto, são utilizados os métodos de compensação de água da mistura ou pré-molhagem.

Conforme citado no item 2.1.4 desta revisão, é importante avaliar a taxa de absorção de água do ARC para que possam ser estabelecidas diretrizes para a compensação desta absorção de água, e estas tenham a finalidade de minimizar a absorção de água da pasta de concreto no estado fresco. Porém, ainda não há consenso sobre a quantidade de água de compensação a ser utilizada e nem sobre a forma mais adequada para realizá-la.

Segundo Leite (2001), esta quantidade maior de água que será incorporada à mistura, propiciará um aumento na relação água/cimento e consequente redução da resistência mecânica do concreto produzido com agregado reciclado. Não foi encontrada na bibliografia, entretanto, uma metodologia para determinar a quantidade de água que efetivamente ficará na argamassa do novo concreto (a fração de água que não está dentro dos poros do agregado reciclado), e que irá definir a relação água/cimento do novo concreto.

2.2.1 Condição de umidade do ARC

A absorção de água dos agregados é determinada colocando-se o agregado em contato com água pura. Barra (1996) explica que para agregados densos, a capacidade de absorção dessa água no tempo é muito baixa, e por isso, a utilização deste material não causa alteração sobre a quantidade de água presente na matriz de cimento dos concretos. Diferentemente, os agregados reciclados apresentam alta capacidade de absorção de água no tempo, como foi constatado por Tegguer (2012) e Tam et al. (2008). Assim, a difusão de água nos poros do agregado reciclado pode variar muito em função do meio e do tempo de contato.

O teor de umidade presente nos agregados pode variar desde agregados saturados até agregados completamente secos. Nos agregados saturados, a quantidade de água livre que pode ser encontrada na superfície do mesmo varia de um agregado para outro, e depende da capacidade que os agregados possuem para o transporte desta água, de acordo com a sua área superficial e sua porosidade. A Figura 7 representa a absorção de água de um agregado em quatro diferentes estágios.



Figura 7 – Representação esquemática das condições de umidade do agregado.

Fonte: adaptado de Neville, 1997.

Poon et al. (2004) citam que quando são utilizados agregados reciclados deve-se tomar cuidado ao utilizar condições extremas de umidade, ou seja, uma condição totalmente saturada, devido ao fato de que esta, além de provocar o aumento da trabalhabilidade do concreto produzido com o resíduo, pode causar danos ao concreto em termos de propriedades mecânicas e de durabilidade. Para Barra (1996) é necessário identificar a condição inicial de umidade do agregado, o tempo de permanência e de contato do mesmo com a água, e se o agregado reciclado entra em contato primeiramente com a água ou com a pasta de cimento.

Substituindo os agregados naturais por agregados reciclados de concreto, a maior porosidade do agregado reciclado pode resultar em um consumo de água mais elevado da pasta da matriz do agregado. A microestrutura dos concretos produzidos com agregados reciclados é fortemente influenciada pela absorção de água e pela forma como esta absorção é compensada. Mesmo em concretos convencionais, a estrutura da interface matriz-agregado é geralmente muito complexa e a região apresenta uma grande quantidade de vazios, os quais promovem uma redução na resistência de ligação. Isso é provocado pelo aumento da quantidade de água na interface devido à exsudação interna no concreto no estado fresco (MEHTA e MONTEIRO, 2008; KONG et al., 2010).

Embora a absorção de água do agregado reciclado seja estimada em solução de água pura, é de extrema importância avaliar o seu comportamento na mistura de concreto. O ensaio com água é uma simplificação do fenômeno real, onde o agregado poroso irá absorver água, uma fração da pasta de cimento e compostos cuja porosidade seja menor que sua

porosidade superficial. Devido a este fato, Barra (1996) propõe a existência de duas situações distintas para a movimentação de água em concretos com agregados reciclados, a partir da condição inicial de umidade dos agregados reciclados saturados e não saturados, inseridos em misturas de concreto, sumarizados na Figura 8 e Figura 9.

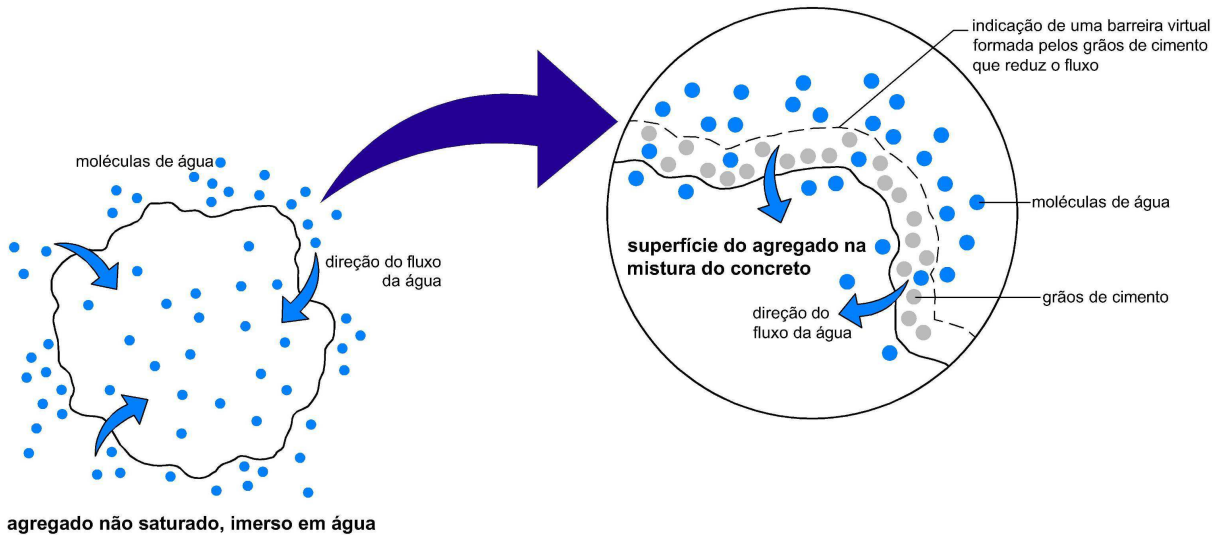


Figura 8 – Representação esquemática do agregado não saturado imerso em água e detalhe de sua superfície na mistura do concreto.

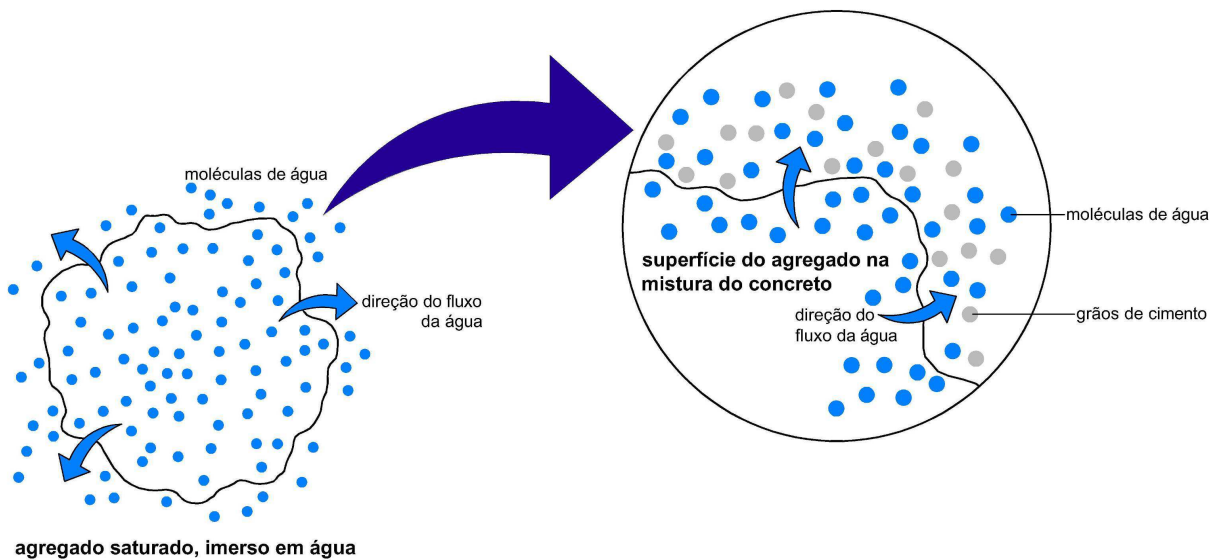


Figura 9 – Representação esquemática do agregado saturado imerso em água e detalhe de sua superfície na mistura do concreto.

A Figura 8 apresenta esquematicamente o que ocorre com o agregado não saturado, quando este é imerso em água, e o detalhe apresenta a superfície do agregado na mistura de concreto. Quando o agregado não saturado é imerso em água, este absorve água e

pode ou não, chegar à saturação, o que depende do tempo de contato com a água e da sua condição inicial de umidade.

Caso o agregado não sature e seja utilizado na mistura de concreto, poderá continuar absorvendo água da mistura. Com a superfície úmida haverá retenção de partículas de cimento na zona de transição, melhorando a aderência, e estes grãos de cimento poderão formar uma barreira virtual na superfície de contato entre o agregado e a matriz, a qual reduzirá a capacidade de absorção do agregado reciclado, conforme apresentado no detalhe da Figura 8.

A Figura 9 mostra esquematicamente o que ocorre com o agregado saturado, quando este é imerso em água, e o detalhe apresenta a superfície do agregado na mistura de concreto. No agregado saturado não haverá movimentação de água para o interior do agregado. Quando este agregado é utilizado para a produção de concreto, e entra em contato com o cimento, também haverá retenção das partículas de cimento na superfície do grão. Entretanto, haverá movimentação da água interna do agregado para a matriz, situando-se na interface pasta-agregado, proporcionando um aumento da relação água/cimento nessa região e reduzindo a aderência da zona de transição.

Como forma de minimizar as alterações nas propriedades dos concretos produzidos, decorrentes da elevada absorção de água do ARC, pode-se realizar uma adição de água à mistura dos concretos produzidos com agregados reciclados, e esta quantidade de água pode ser compensada na quantidade de água de amassamento da mistura ou através da pré-molhagem do agregado reciclado.

2.2.2 Compensação de água na água de amassamento da mistura

Quando a opção escolhida para compensar a elevada absorção de água do agregado reciclado é a de compensar a água de amassamento da mistura, utiliza-se nesta, uma quantidade de água adicional, correspondente à quantidade total ou parcial de água absorvida pelos agregados reciclados, e o ARC, ao se misturar com a pasta de cimento, irá absorver parte desta água. A quantidade de água a se adicionar irá depender do teor de umidade inicial e da absorção efetiva do ARC durante o tempo de mistura.

Neville (1992) apud Coutinho (2006) destaca a possibilidade de que, ao se adicionar o agregado reciclado seco, as partículas sejam imediatamente cobertas pela pasta de cimento, impedindo assim, a entrada de água necessária à saturação dos agregados, ou seja, que a absorção efetiva não coincida com a considerada. Isto implicaria que a relação

água/cimento da pasta resultasse em um valor superior ao desejado. Segundo o autor, esta situação será tanto mais acentuada quanto mais rica em cimento for a pasta. Ferreira (2007) enfatiza a importância do conhecimento da absorção potencial, e se possível, a evolução da absorção ao longo do tempo, para que se possa prever a evolução da relação água/cimento após a mistura. O autor cita que a opção pelo método de compensação da água durante a mistura, apresenta a vantagem de que a execução do concreto com ARC possa ser conduzida de maneira similar à produção de um concreto convencional. Brito (2005) ressalta que a manutenção da trabalhabilidade e da relação água/cimento efetiva demandam prudência, pois um aumento da quantidade de água na pasta poderá ter consequências ao nível da porosidade da matriz do novo concreto.

2.2.3 Pré-molhagem

Outra forma de tentar amenizar o efeito da absorção de água do agregado reciclado durante a mistura de um concreto é a realização de uma pré-molhagem do agregado reciclado, onde o ARC é adicionado à mistura no estado saturado, com a finalidade de anular a absorção de água da mistura, ou com um teor de umidade elevado, tornando a absorção pouco significativa. As formas e tempos determinados para a execução desta pré-molhagem são bastante diversificadas, sendo realizadas através de aspersão da quantidade de água sobre o agregado reciclado ou através de saturação do mesmo. A pré-molhagem do material reciclado para a produção de concretos ou argamassas é recomendada por alguns autores (BARRA, 1996; POON et al., 2004; ETXBERRIA et al., 2007) devido à possibilidade dos agregados absorverem a água designada a hidratação do cimento e à trabalhabilidade do concreto. Considerando-se esta questão, faz-se necessária a realização de uma compensação da absorção de água do material reciclado utilizado para a produção de novos concretos.

Segundo Oliveira e Vazquez (1996) é aconselhado que seja feita uma saturação do agregado reciclado, por imersão dos agregados em água, antes da produção do concreto. Buttler (2007) afirma que se forem utilizados agregados não saturados misturados simultaneamente aos demais materiais da mistura, estes irão absorver uma quantidade significativa de água e partículas de cimento, ocasionando uma densificação do agregado, enfraquecendo assim, a zona de transição e provocando uma redução de resistência do concreto. Por outro lado, se for realizada a saturação dos agregados previamente à mistura, acontecerá a migração da água destes agregados para a pasta fresca. O autor considera que a água concentrada no agregado pode ser definida como água livre, e quando ocorrer a movimentação desta na mistura fresca, o resultado será a elevação da relação água/cimento na

zona de transição, fato este que contribuirá para o aumento do índice de vazios e resultará na perda da resistência.

Cabral et al. (2007) alegam que a água de pré-molhagem absorvida primeiramente pelos agregados reciclados, posteriormente torna-se disponível no interior da mistura, sendo capaz de hidratar as partículas de cimento não hidratadas, além de auxiliar no processo de cura do concreto. Porém, isto poderá ocorrer dependendo da quantidade do teor de pré-molhagem utilizado. A presença de água no agregado propicia também o desenvolvimento de uma boa zona de transição entre a nova pasta e o agregado reciclado. Etxeberria et al. (2007) afirmam que devido ao aumento da absorção de água que ocorre no concreto produzido com agregados graúdos reciclados e areia natural, estes usualmente necessitam de 5% mais água do que o concreto convencional a fim de alcançar a mesma trabalhabilidade.

Werle (2010) propôs a pré-molhagem como forma de controlar o efeito da absorção de água do agregado reciclado, onde utilizou os teores de 0, 25, 50, 75 e 100% em função da capacidade de absorção de água do agregado, através do seguinte procedimento: o agregado é inserido em um recipiente metálico, previamente umedecido, para que a água designada à pré-molhagem não seja aderida ao recipiente. A água necessária para a pré-molhagem é então pesada e após este procedimento, a mesma é aspergida sobre o agregado através da utilização de um regador. À medida que a água é despejada sobre os agregados, os mesmos vão sendo misturados manualmente, permitindo assim que ocorra uma molhagem homogênea dos grãos. O tempo estabelecido para a finalização desta etapa é de 10 minutos, garantindo que as operações sejam realizadas sem ultrapassar os tempos ideais de absorção inicial. A autora constatou, que para os resultados obtidos em sua pesquisa, é possível determinar um possível percentual limite de pré-molhagem de 50%, pois de acordo com os dados, acima deste percentual, ocorre uma redução na resistência dos concretos produzidos.

Ferreira (2007) testou e comparou a compensação de água na mistura e a pré-molhagem do ARC. Para a compensação de água, foi realizado um cálculo estipulando-se a quantidade de água a ser incorporada ao concreto, no decorrer da mistura. Já a pré-molhagem do ARC ocorreu no interior da betoneira, com esta em funcionamento, através da mistura da quantidade total de água (quantidade de água relativa à relação água/cimento estabelecida, somada à quantidade de água relativa à absorção do ARC) e quantidade total de ARC antes da adição dos demais materiais. Levando em conta que no resultado do ensaio de absorção de água ao longo do tempo do ARC, o agregado alcançou cerca de 90% de seu potencial de absorção aos 5 minutos, o autor estipulou este tempo como o necessário para a pré-molhagem.

Findo este período, o restante dos materiais foi inserido à mistura, totalizando um período de mistura do concreto de 10 minutos. O autor observou uma queda na resistência do concreto produzido através da pré-molhagem quando comparada à resistência do concreto produzido através da compensação de água na mistura, e concluiu, portanto, que a primeira, da maneira como foi realizada, não é apropriada como forma de controlar os efeitos da elevada absorção de água do ARC.

Analisando-se os procedimentos adotados para a pré-molhagem propostos por Ferreira (2007) e Werle (2010), onde a água é misturada ao agregado reciclado dentro da betoneira ou manualmente, considera-se importante observar a dificuldade de que os agregados sejam saturados de maneira uniforme através destas formas de mistura.

A Norma ABNT NBR 15116:2004 recomenda que seja realizada uma pré-molhagem dos agregados, empregando valores em torno de 80% da taxa de absorção total de água do agregado. Portanto, devido ao fato de que o agregado reciclado de concreto apresenta uma maior absorção de água em comparação ao agregado natural, e da literatura apresentada, considera-se importante que ocorra uma compensação na demanda de água durante a dosagem de concretos com agregados reciclados.

Devido ao agregado reciclado ser mais poroso, evidentemente irá carecer de uma maior quantidade de água para alcançar a mesma trabalhabilidade de um concreto produzido com agregado convencional. Compensar parcialmente a absorção dos agregados reciclados mostra-se uma alternativa adequada em busca de minimizar os problemas com trabalhabilidade das misturas, e ao mesmo tempo indicada para que o excesso de água no concreto não contribua para a redução da resistência mecânica. Na Tabela 4 é apresentado um resumo do levantamento bibliográfico em relação aos teores de pré-molhagem do ARC utilizados.

Tabela 4 – Levantamento bibliográfico relativo aos teores de pré-molhagem do ARC.

Autor	Teor de pré-molhagem (%)
Leite (2001)	40 - 50
Ferreira (2007)	90
Werle (2010); Troian (2010)	0 - 25 - 50 - 75 - 100
Fedumenti (2013)	50

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO PRODUZIDO COM ARC

Em função da opção pela substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto, a maior porosidade do agregado reciclado, conforme descrita anteriormente apresentará uma consequência visível através da maior absorção de água da pasta da matriz, quando comparado a um concreto produzido com agregado natural, e as propriedades do concreto fresco assim como do concreto endurecido, sofrerão alterações. As diferenças entre as propriedades dos concretos produzidos com ARC e concretos convencionais dependem, entre outras variáveis, do teor de agregado natural substituído, das características dos agregados reciclados empregados e da quantidade de contaminantes e finos que estão presentes nos mesmos. A seguir, serão exploradas algumas propriedades dos concretos produzidos com agregado reciclado de concreto.

2.3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade pode ser considerada como uma das propriedades mais importantes do concreto fresco, uma vez que a mesma exerce grande influência sobre as propriedades do concreto no estado endurecido. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), um concreto que seja difícil para se lançar e adensar, não só causará o aumento do custo de manipulação, como também terá a sua resistência, durabilidade e aparência inadequadas. A trabalhabilidade é uma das propriedades mais afetadas pela utilização de agregados reciclados, devido principalmente, a forma mais irregular e textura áspera dos agregados, assim como por sua alta taxa de absorção. Os concretos produzidos com agregados reciclados oferecem uma consistência mais seca do que os concretos convencionais, produzidos com a mesma relação água/cimento. Esta tendência é justificada através da maior porosidade que o agregado reciclado possui em relação ao agregado natural, o qual eleva a absorção de água no decorrer da mistura.

Ferreira (2007) verificou que a trabalhabilidade dos concretos nem sempre é coerente com os valores apresentados pelo ensaio de abatimento, concluindo que isoladamente, este ensaio não é suficiente para avaliar a trabalhabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados. O autor apontou também, que a trabalhabilidade do concreto aferida através do ensaio de abatimento, não é sensível ao método de compensação de água dos agregados reciclados.

Além do acréscimo de água, outro recurso utilizado para compensar a perda da trabalhabilidade, característica do concreto produzido com agregado reciclado, é a utilização

de aditivo (superplastificante) na produção do concreto, como forma de reduzir a quantidade de água necessária à mistura.

2.3.2 Massa específica no estado fresco

A massa específica do concreto produzido com agregado reciclado, no estado fresco tende a ser menor que a do concreto convencional devido a menor massa específica apresentada pelo agregado reciclado e por uma quantidade maior de vazios incorporada ao concreto com este material (LEITE, 2001). Para Fonseca (2008), a massa específica do concreto no estado fresco é o reflexo da massa específica de seus componentes, em especial dos agregados, bem como seu grau de compactação (existência de ar no interior do concreto).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a massa específica do concreto no estado fresco depende além da massa do agregado e de sua porosidade, da sua textura e de seu tamanho. Em seu estudo, Carrijo (2005) quantificou a variação da massa específica do concreto fresco em função da relação água/cimento e da massa específica do agregado utilizado, e constatou que a média que se reduz a massa específica do agregado e se aumenta a relação água/cimento, ocorre a redução da massa específica do concreto produzido.

2.3.3 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão de um concreto é afetada diretamente por todos os materiais que compõem este concreto. A qualidade do agregado reciclado de concreto influencia significativamente na resistência à compressão do novo concreto, devido ao efeito da quantidade de cimento e de argamassa aderidos às partículas de agregado reciclado. A resistência à compressão axial é avaliada como uma das propriedades de extrema importância dos concretos no estado endurecido, embora outras características como durabilidade e permeabilidade sejam de fato as mais importantes quando se quer prever a vida útil de uma estrutura inserida em um determinado ambiente.

Vieira e Dal Molin (2004) citam que a maior porosidade e menor resistência dos agregados graúdos reciclados, são fatores que podem influenciar na resistência à compressão obtida nos novos concretos, pois devido à alta porosidade, os agregados reciclados de concreto possuem uma alta taxa de absorção de água. De acordo com Leite (2001) e Cabral (2007) a relação água/cimento é o fator que mais interfere na resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados reciclados, pois quanto maior for a relação água/cimento, maior será a porosidade gerada na matriz do concreto, ocasionando perda na resistência. Padmini et al. (2009) concluíram em sua pesquisa com concretos produzidos com

ARC que quanto maior a resistência do concreto que originou o agregado, maior será a resistência do concreto produzido com este agregado.

Werle (2010) verificou que a resistência do ARC empregado possui grande influência sobre o comportamento da resistência à compressão do novo concreto. Ao utilizar ARC de resistência similar ou superior ao do novo concreto, o mesmo não exerce influência na resistência do novo concreto, porém quando a opção é pela adoção de ARC de baixa resistência, tomando-se como referência a resistência do concreto onde o ARC será inserido, verifica-se a redução da resistência. Em relação à influência dos teores de pré-molhagem dos agregados na resistência à compressão dos concretos, a autora observa que não houve influência significativa para os resultados, e o teor de substituição de até 50% de agregados naturais por agregados reciclados é considerado apropriado para que sejam mantidas as características mecânicas adequadas à aplicação em concretos para fins estruturais.

López-Gayarre et al. (2009) citam que o percentual de substituição, de um agregado reciclado de alta resistência não irá afetar a resistência à compressão do novo concreto, desde que a relação água/cimento seja mantida constante na mistura de concreto e a perda de trabalhabilidade seja compensada com aditivos. González-Fonteboa et al. (2011) obtiveram valores de resistência à compressão axial, aos 28 dias, entre 32 e 38 MPa, para a taxa de substituição de 50% de AGN por ARC. Kou et al. (2008) constataram uma redução na resistência dos concretos produzidos com agregado reciclado e enfatizam que esta desvantagem possa ser compensada através de uma redução na relação água/cimento utilizada.

Gonçalves (2011) obteve em seu estudo, aos 28 dias, médias entre 23,9 e 31,2 MPa para os resultados de resistência à compressão axial dos concretos produzidos com o mesmo agregado reciclado utilizado nesta pesquisa. Ferreira (2007) obteve médias de resistência de 50,4 MPa para o concreto produzido com pré-molhagem do ARC, e médias de resistência de 52,9 MPa para o concreto produzido com compensação de água na mistura, concluindo que a pré-molhagem do ARC, da forma como foi realizada, é prejudicial ao desempenho mecânico do concreto, em especial em relação à sua durabilidade, sendo preferível assim, realizar a compensação de água na mistura como forma de controlar os efeitos da elevada absorção de água do ARC. O autor nomeia uma taxa de substituição de até 50% de AGN por ARC como adequada para as misturas de concretos.

É importante destacar a dificuldade de generalizar os resultados obtidos em pesquisas do meio acadêmico devido às diferenças metodológicas, assim como as diferenças

existentes entre os agregados reciclados utilizados. Contudo, considerando-se estas limitações, é possível classificar como satisfatórios os resultados de resistência à compressão axial obtidos em concretos estruturais.

2.3.4 Durabilidade

Durabilidade é uma característica qualitativa dos materiais, que indica a sua capacidade de atender ou não à vida útil exigida para os mesmos. A vida útil de um material é o tempo no qual o mesmo permanece em uso, mantendo as características que foram estabelecidas no momento da concepção da edificação que ele compõe. Logo, a vida útil é a quantificação da durabilidade do material. A norma NBR 6118:2007 conceitualiza durabilidade das estruturas de concreto armado como a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto e o contratante no início dos trabalhos de elaboração do projeto, e define vida útil como o período de tempo em que as características originais da estrutura de concreto são mantidas, sem que exista a demanda por manutenções ou reparos, além daquelas originalmente estabelecidas.

O período de tempo durante o qual as estruturas de concreto podem ser conservadas sem que exista a necessidade de reparos e manutenções, além daquelas previamente estabelecidas é definido como vida útil da estrutura, segundo a ABNT NBR 6118:2007. Conforme definido pela ABNT NBR 15575-1:2012, vida útil é uma medida temporal da durabilidade de uma edificação ou de suas partes, ou seja, vista a edificação como um todo, ou por elementos e componentes individuais. Uma estrutura será avaliada como durável quando satisfizer as especificações de projeto, permanecendo resistente e segura ao longo de um período de tempo pré-estabelecido.

A durabilidade das estruturas de concreto possui uma ligação estreita com a sua permeabilidade, a qual é a função da absorção de água do concreto no estado endurecido. A durabilidade incide diretamente na facilidade ou dificuldade do transporte de fluídos dentro do concreto, classificado assim, como um concreto pouco ou muito permeável, e o concreto produzido com agregados reciclados também deverá responder a essa facilidade, ou não, do transporte desses fluídos, para a avaliação de sua durabilidade (VIEIRA, 2003).

Estas considerações estão cada vez mais presentes no meio da construção civil, pois estão sendo aplicadas a todos os componentes das edificações, e entre estes, o concreto recebe destaque por se tratar do material de maior emprego e também por ser um material de uso estrutural. Conforme Meddah et al. (2010), a expansão dos conceitos de durabilidade em

estruturas de concreto armado e sua vida útil estão se tornando uma questão-chave neste século para limitar as operações de manutenção e os custos adicionais.

O tamanho, o volume dos poros e sua continuidade, assim como o entendimento do mecanismo de transporte de umidade no concreto, são fatores importantes para estimar a vida útil das estruturas de concreto, bem como garantir a sua qualidade. Levy (2001) cita que é através da estrutura dos poros, que penetram, se difundem ou percolam todos os agentes agressivos do meio-ambiente, e devido a este fato é imprescindível o estudo da absorção de um concreto em um estudo de durabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos objetivos propostos, foi elaborado e desenvolvido um programa experimental, o qual estabelece variáveis de análise, materiais e métodos de experimentos. Os materiais utilizados no programa experimental são produzidos na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Os métodos foram utilizados de acordo com embasamento teórico na bibliografia apresentada, e o detalhamento do programa experimental é descrito na sequência.

3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Para um eficiente desenvolvimento do programa experimental definido, foi realizado um planejamento detalhado, considerando o objetivo da pesquisa e um cronograma das atividades desenvolvidas. A Figura 10 apresenta o fluxograma experimental desta pesquisa, e na sequência são estabelecidas as variáveis de resposta do mesmo.

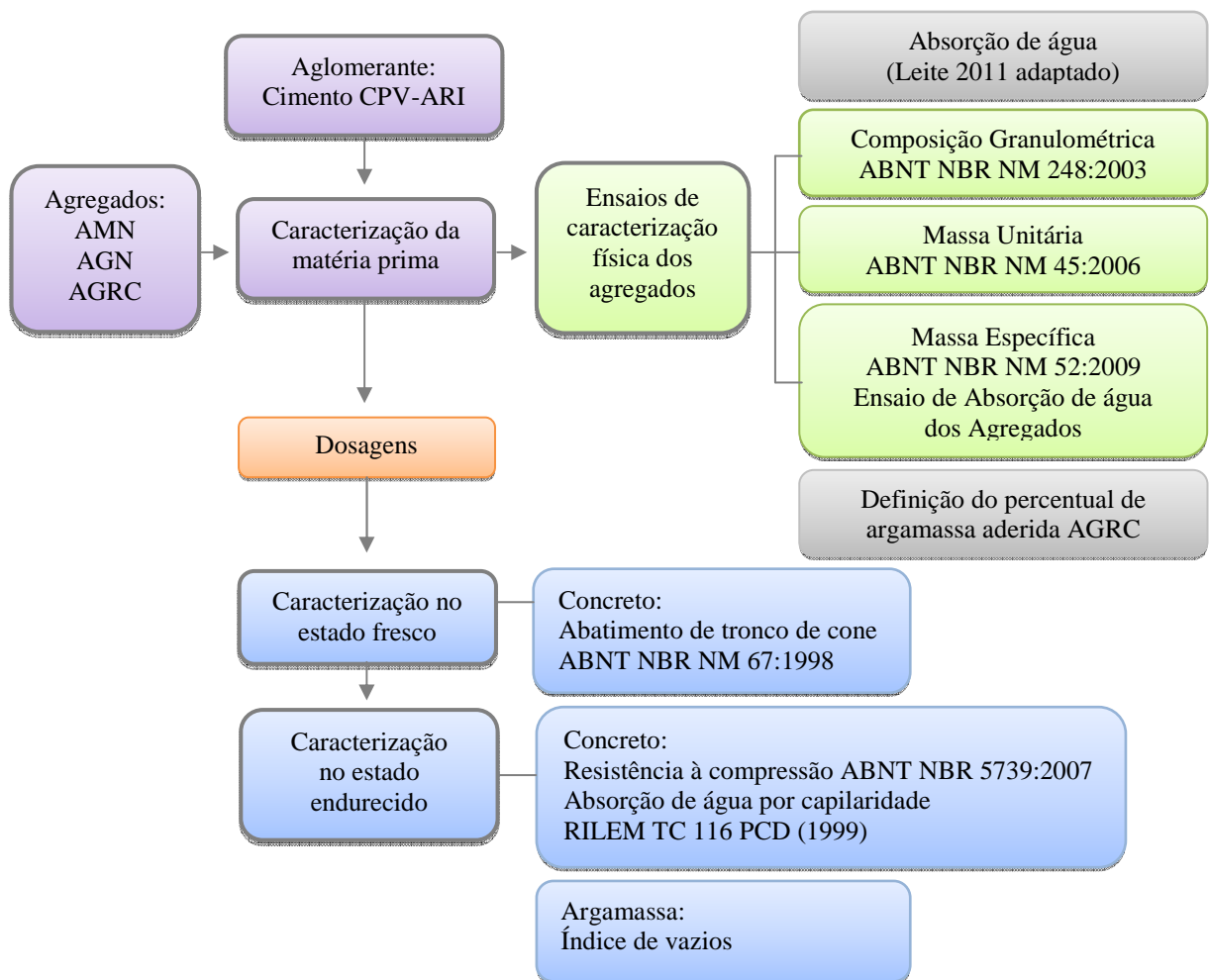


Figura 10 – Fluxograma da pesquisa.

Na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, é apresentada a metodologia experimental que contempla este trabalho.

Tabela 5 – Programa experimental – Caracterização da matéria-prima.

Planejamento dos ensaios realizados na matéria-prima			
AN		AGRC	
Ensaio	Procedimentos	Ensaio	Procedimentos
Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003	Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009	Massa específica	ABNT NBR NM 53:2009 e Ensaio de Absorção de Água
Massa unitária	ABNT NBR NM 45:2006	Massa unitária	ABNT NBR NM 45:2006
Absorção de água	Leite 2011 adaptado	Absorção de água	Leite 2011 adaptado
		Definição do percentual de argamassa no AGRC	Heineck 2012

Tabela 6 – Programa experimental – Concretos produzidos com AGRC.

Planejamento dos ensaios realizados nos concretos		
Ensaio no estado fresco		
Ensaio	Objetivos	Procedimentos
Abatimento ao longo do tempo	Determinação da trabalhabilidade	ABNT NBR NM 67:1998

Tabela 7 – Programa experimental – Concretos produzidos com AGRC e argamassas equivalentes.

Planejamento dos ensaios realizados nos concretos e argamassas equivalentes			
Ensaio no estado endurecido			
	Ensaio	Objetivo	Procedimentos
Concretos	Resistência à compressão	Caracterização das propriedades mecânicas	ABNT NBR 5739:2007
	Absorção de água por capilaridade	Determinação da influência do transporte de água na porosidade dos concretos	RILEM TC 116 PCD (1999)
Argamassas	Porosidade total	Determinação da influência do transporte de água na porosidade das argamassas	Determinação do volume de vazios

3.1.1 Fatores de controle

Os fatores de controle e seus níveis fixos foram determinados de forma a possibilitar a avaliação das influências que exercem sobre os fatores de resposta estabelecidos, sendo listados na sequência:

- Relação água/cimento inicial de 0,45; 0,55 e 0,65: De acordo com ABNT NBR 6118:2007, para estruturas de concreto armado é definida a utilização de uma relação a/c menor ou igual a 0,65. A opção por diferentes relações a/c busca elaborar concretos com diferentes resistências, procurando estabelecer a melhor relação para a substituição do agregado natural por agregado reciclado.
- Teor de agregado graúdo reciclado de concreto fixado em 50%: Foi utilizado o teor de 50% de agregado graúdo reciclado de concreto em substituição ao agregado graúdo natural, embasado nos referenciais teóricos citados. A britagem do concreto foi executada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, através do uso de um britador de mandíbulas. Depois de britado e devidamente peneirado, o material foi armazenado em local apropriado.
- O abatimento de tronco de cone estabelecido para este programa foi de 100 ± 20 mm. Para que fossem mantidos fixos os valores de abatimento, foi introduzido água ou um aditivo superplastificante à mistura.
- Teor de pré-molhagem do AGRC: Foram estabelecidas diferentes taxas de pré-molhagem de 40, 60, 80 e 100%, em relação à condição do agregado saturado com superfície seca.
- Absorção de água por capilaridade nos tempos de 1, 2, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos.
- Massa específica da argamassa coletada do concreto aos 10, 30, 60, 90 e 120 minutos.

3.1.2 Fatores de resposta

Em busca dos objetivos determinados, para os concretos confeccionados com AGN e AGRC produzidos com e sem aditivo, e argamassas provenientes destes concretos, foram estipuladas as seguintes variáveis de resposta:

Para os concretos:

- Abatimento ao longo do tempo;
- Resistência à compressão axial, aos 28 dias, em MPa;
- Absorção de água por capilaridade;

Para as argamassas:

- Estimativa do volume de vazios determinado a partir da variação da massa específica, aos 3 dias.

3.1.3 Fatores não controlados

Algumas variáveis do estudo não foram possíveis de controle, são elas: Temperatura e umidade da sala de mistura e moldagem dos concretos. Em função da inexistência de climatização neste ambiente, foram adotados alguns cuidados tentando compensar eventuais perdas de umidade, tais como cobrir a cuba da betoneira com pano molhado durante o período de espera. Procurou-se executar as atividades de mistura e moldagem dos corpos de prova no menor tempo possível, sendo logo a seguir transferidos para a sala de cura.

3.1.4 Análise estatística dos resultados

De acordo com Dal Molin et al. (2005), o emprego de um planejamento estatístico para a execução de um programa experimental contribui para o enriquecimento dos resultados obtidos através dos ensaios realizados.

Os dados coletados nos ensaios foram tratados estatisticamente com o intuito de prever o comportamento da variável de resposta, em função das variáveis de controle. Para a realização destas análises foi utilizado o software *Statgraphics Centurion XVI* (versão demonstrativa) e o nível de confiança adotado foi de 95%. Com a aplicação da ferramenta de Análise de Variância (ANOVA), foi possível analisar quais são os fatores que interferem significativamente no comportamento das variáveis de resposta, assim como verificar se as interações entre estes fatores são ou não significativas estatisticamente. Os resultados da análise estatística serão apresentados juntamente com os resultados dos ensaios realizados, sob a forma de tabelas de Análise de Variância (ANOVA) e através de gráficos de médias do efeito isolado de cada fator sobre a variável de resposta e o efeito da interação entre os fatores de controle sobre a variável de resposta.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Cimento

O cimento designado para esta pesquisa é o cimento Portland de alta resistência inicial – CPV-ARI. A opção por este cimento se deve ao fato da pesquisa fazer parte de um projeto em rede, e este ter sido o tipo de cimento definido para a pesquisa em todas as instituições que englobam a mesma. Além disso, o cimento CPV-ARI possui a capacidade de proporcionar um rápido grau de hidratação das amostras, o que o torna um cimento mais puro, além do fato do mesmo ser comercialmente disponível na região de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

O cimento foi obtido de um único lote de produção. Na Tabela 8 e Tabela 9 são apresentadas as propriedades fornecidas pelo fabricante.

Tabela 8 – Características químicas do cimento Portland CPV-ARI RS.

Ensaio Químico CPV-ARI RS fabricado em 28 de maio/2012		
Teores (%)	Resultados	Limites da ABNT NBR 5737:1992
PF	3,40	≤ 4,50
MgO	6,03	≤ 6,50
SO ₃	3,03	Não aplicável
RI	6,42	Não aplicável

Fonte: Fabricante (2012).

Tabela 9 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CPV-ARI RS.

Ensaio Físico e Mecânico CPV-ARI RS fabricado em 28 de maio/2012		
Características avaliadas	Resultados	Limites da ABNT NBR 5737:1992
Resistência à compressão (MPa) (1 dia)	22,60	≥ 11,0
Resistência à compressão (MPa) (3 dias)	35,10	≥ 24,0
Resistência à compressão (MPa) (7 dias)	38,80	≥ 34,0
Resistência à compressão (MPa) (28 dias)	46,70	Não aplicável
Finura #200 (%)	0,10	≤ 6,0
Finura #325 (%)	1,00	Não aplicável
Blaine (cm ² /g)	5040	≥ 3000
Água de Cons. (%)	28,80	Não aplicável
Tempo de pega (h:m) Início	230	≥ 60
Tempo de pega (h:m) Fim	290	≤ 600
Expansão à quente (mm)	0,00	≤ 5,0

Fonte: Fabricante (2012).

3.2.2 Agregados

Os agregados foram caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) – Unisinos. Os ensaios que determinam as características físicas dos agregados foram embasados nos seguintes procedimentos:

- Composição granulométrica conforme a norma ABNT NBR NM 248:2003;
- Massa específica do agregado miúdo de acordo com a norma ABNT NBR NM 52:2009;
- Massa específica dos agregados graúdos segundo a norma ABNT NBR NM 53:2009 e através do ensaio de absorção de água dos agregados;
- Massa unitária seguindo as especificações da norma ABNT NBR NM 45:2006.

3.2.2.1 Agregado miúdo natural (AMN)

O agregado miúdo destinado ao experimento foi uma areia de origem quartzosa, proveniente de extração no Rio Jacuí, Rio Grande do Sul. Este material vem sendo utilizado pelo grupo de pesquisa da Unisinos. O material foi previamente seco em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ por um período de 48h, e então submetido a um processo de peneiramento, utilizando-se o material retido entre as peneiras # 4,8 mm e # 0,075 mm. O fíler existente na areia não foi retirado, e corresponde a 1% do agregado miúdo. As características físicas deste material podem ser visualizadas na Tabela 10. A curva da composição granulométrica é apresentada na Figura 11, apresentando-se dentro da zona utilizável segundo a NBR NM 248:2003.

Tabela 10 – Características físicas do agregado miúdo natural.

Abertura de peneira #	% Retido	% Acumulado
6,3 mm	1	1
4,8 mm	1	2
2,4 mm	7	9
1,2 mm	13	22
0,6 mm	20	42
0,3 mm	37	79
0,15 mm	17	96
0,075 mm	3	99
<0,15	1	100,0
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	
Módulo de finura	2,50	

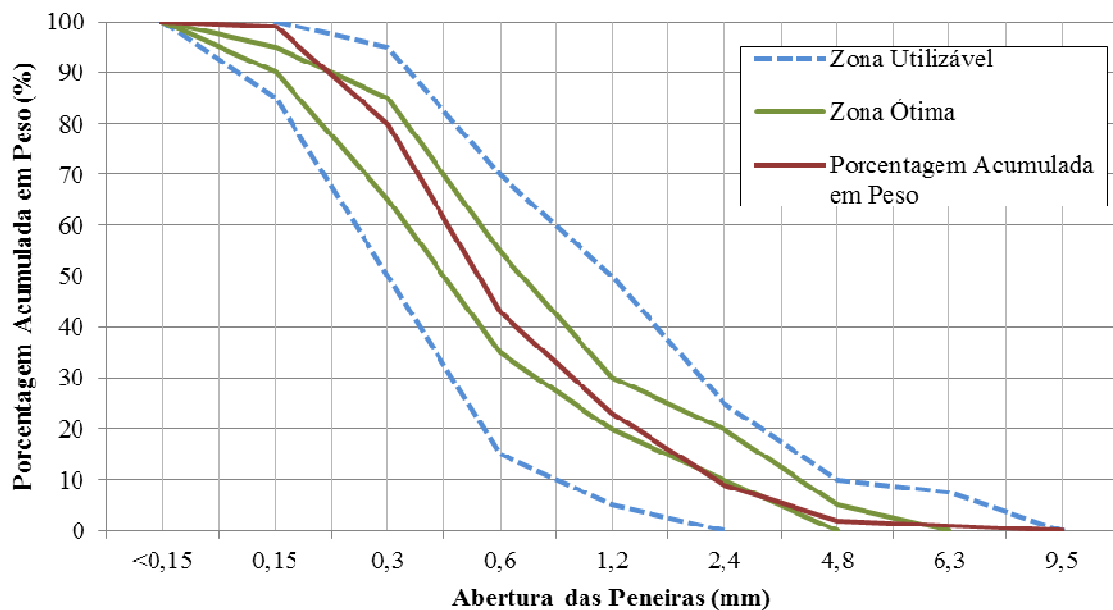


Figura 11 – Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.

3.2.2.2 Agregado graúdo natural (AGN)

O agregado graúdo natural adotado para a pesquisa é de origem basáltica, denominado de brita 1 e proveniente de uma usina de britagem localizada na cidade de Campo Bom, na região de Quatro Colônias, Rio Grande do Sul. O material foi lavado com o auxílio de um misturador de eixo inclinado, buscando-se a eliminação de resíduos que pudessem vir a contaminar este agregado. Após a lavagem do mesmo, o material foi seco em

estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 48h para que então fosse realizado o peneiramento do mesmo. A fração utilizada no presente estudo foi a fração passante na peneira # 19 mm e retida na peneira # 4,8 mm.

Os resultados dos ensaios para o AGN podem ser observados a seguir. As características físicas deste material podem ser visualizadas na Tabela 11 onde, de acordo com os ensaios realizados, o agregado graúdo apresenta-se dentro da zona utilizável, definida dentro dos padrões normatizados pela ABNT NM 248:2003.

Tabela 11 – Características físicas do agregado graúdo natural.

Abertura de peneira #	% Retido	% Acumulado
19 mm	1	1
12,5 mm	57	58
9,5 mm	33	91
6,3 mm	9	100
4,8 mm	0	100
Dimensão máxima característica (mm)	19	
Módulo de finura	6,92	

3.2.2.3 Agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)

O AGRC designado para a pesquisa é proveniente de resíduos procedentes de uma empresa de pré-fabricados localizada na região metropolitana de Porto Alegre. O AGRC é oriundo de um concreto com f_{cj} de 35 MPa, o qual foi submetido a um ciclo de cura térmica.

A britagem deste agregado foi executada através da utilização de um britador de mandíbulas. Após a britagem, o material foi armazenado em local apropriado, de onde foi removido e seco em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24h para que então fosse realizado o peneiramento do mesmo. A parcela avaliada adequada ao uso foi a fração passante na peneira # 19 mm e retida na peneira # 4,8 mm, em função da dimensão máxima de referência do agregado graúdo natural.

A distribuição granulométrica do AGRC utilizado pode ser visualizada na Tabela 12 onde, de acordo com os ensaios realizados, o agregado graúdo reciclado de concreto é classificado na faixa granulométrica compreendida entre 19 e 25 mm, definida dentro dos padrões normatizados pela ABNT NM 248:2003.

Tabela 12 – Características físicas do agregado graúdo reciclado de concreto.

Abertura de peneira #	% Retido	% Acumulado
19 mm	36	36
12,5 mm	43	79
9,5 mm	10	89
6,3 mm	10	99
4,8 mm	1	100
Dimensão máxima característica (mm)	19	
Módulo de finura	7,25	

Apesar de existir uma diferença de módulo de finura com relação ao agregado natural, em função da quantidade de material disponibilizada para a pesquisa, não foi realizado um ajuste da curva granulométrica deste agregado para deixá-la equivalente à do agregado natural. Deste modo, o agregado foi utilizado na mesma distribuição granulométrica em que foi gerado, sendo apenas retirada a fração de agregado miúdo.

3.2.3 Massa unitária e massa específica dos agregados

Além das características apresentadas anteriormente, foram determinadas a massa unitária e massa específica dos agregados utilizados na pesquisa, e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 13.

A massa específica dos agregados graúdos foi determinada de acordo com a norma NBR NM 52:2009 e também através do ensaio de absorção de água do agregado, onde os resultados obtidos foram 2,73 e 2,90kg/dm³ respectivamente, para o AGN, e 2,21 e 2,58kg/dm³ respectivamente, para o AGRC, para 24 horas de ensaio, onde optou-se por utilizar nesta pesquisa, o valor obtido através do ensaio de absorção de água do agregado graúdo, pelo fato de considerar este ensaio mais confiável. A massa unitária dos agregados graúdos foi determinada de acordo com a norma NBR NM 45:2006.

Tabela 13 – Massa unitária e massa específica dos agregados.

Tipo de agregado	Massa unitária (kg/dm ³)	Massa específica (kg/dm ³)
AMN	1,47	2,57
AGN	1,51	2,90*
AGRC	1,13	2,58

*A massa específica do agregado natural (basalto) é superior aos valores usualmente encontrados na literatura, mas é usual nas pedreiras da região.

3.2.4 Absorção do ARC

Conforme apresentado previamente nesta revisão, o agregado graúdo reciclado diferencia-se do agregado graúdo natural principalmente devido à sua maior porosidade e alta taxa de absorção. Este fato deve-se à fração de argamassa normalmente aderida ao agregado reciclado, e em decorrência disto, o conhecimento da taxa de absorção é relevante em dosagens de concretos, de maneira a evitar que os agregados absorvam água da mistura, e que isto reflita na queda da trabalhabilidade do concreto produzido com agregado reciclado. Em busca de minimizar os efeitos desta absorção, é indicado que exista uma compensação na demanda de água durante a dosagem destes concretos, sendo esta realizada através do método de pré-molhagem dos agregados ou através de acréscimo de água na água de amassamento.

A norma NBR 15116:2004 estabelece requisitos para a utilização dos agregados reciclados de concreto sem função estrutural, recomendando que seja realizada a pré-molhagem, empregando valores de 80% da taxa de absorção total de água do agregado.

A norma NBR NM 53:2009 descreve o ensaio para a determinação da taxa de absorção para agregados graúdos naturais, porém, a utilização desta norma para a determinação da taxa de absorção de água dos agregados reciclados não se mostra adequada para este material, devido a sua alta porosidade e a possibilidade de perda de material por desagregação do mesmo.

Cordeiro (2011) testou cinco destes métodos, sendo eles: Dias (2004), Leite (2001), a norma NBR NM 53:2009, o método de absorção de água por imersão adaptado de Leite (2001) por Werle et al. (2010) e também, em parceria com as referidas autoras, realizou algumas modificações ao método proposto por Leite (2001), que recebia críticas, gerando assim, a referência Leite et al. (2011). Com base nos métodos avaliados por Cordeiro (2011), optou-se neste estudo por utilizar o método de absorção de água por imersão dos agregados ao longo do tempo proposto por Leite et al. (2011), sendo que o mesmo encontra-se detalhado na sequência:

O procedimento consiste em separar, em bandejas, aproximadamente 1000 g de agregados. Previamente à realização do ensaio, a amostra é seca em estufa até a estabilidade da massa. Após este período, o material é armazenado em dessecador com sílica gel até a estabilização da temperatura. O aparato é então montado sobre a balança hidrostática, a amostra é inserida em um recipiente vazado (cesto de arame com abertura de malha e capacidade adequadas) e este é então submerso cuidadosamente, de maneira que se tenha uma lâmina de água para imersão de aproximadamente 1 centímetro. O ensaio que determina a

taxa de absorção do agregado reciclado pode ser dividido em duas etapas, conforme descritas a seguir.

Etapa 1 - Registro de absorção de água ao longo do tempo:

Efetuem-se leituras consecutivas de ganho de massa do conjunto, conforme os intervalos pré-determinados: 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 90 minutos; 2, 3, 6, 24, 48, 72 horas; 7, 14, 21, 28 dias ou o período necessário para que ocorra a estabilização no ganho de massa. Previamente à realização de cada leitura, o material deve ser cuidadosamente agitado, com o auxílio de uma espátula de silicone, de forma a facilitar a saída de ar aprisionado entre as partículas de agregados. Ao fim do período estipulado, após ocorrer a estabilização no ganho de massa, escoar-se o excesso de água, retirar-se o material com cuidado para evitar perdas, e coloca-o em uma bandeja metálica que é levada a estufa, onde permanece até a constância da massa. A massa seca é então pesada, sendo que a perda de material durante o ensaio não deve ser superior a 0,05%. O ensaio deve ser realizado com no mínimo, duas repetições. Na Figura 12 são observados o aparato e as amostras do ensaio de absorção de água.



Figura 12 – Ensaio de absorção de água do AGN e AGRC.

Etapa 2 - Registro de absorção de água no primeiro minuto:

Após a conclusão da primeira etapa, foi aferida a diferença de massa entre o AGRC seco e a massa do AGRC após imersão em água, a qual representa o volume total dos vazios. O peso final da amostra é então dividido pelo volume total de poros obtido, para o cálculo da massa específica do agregado.

Esta sequência foi realizada com 3 amostras de 1000 g de AGRC e decidiu-se também analisar a taxa de absorção do AGN através do mesmo ensaio, com mais 3 amostras de 1000 g de AGN. As amostras permaneceram submersas ininterruptamente até o momento

em que ocorreu a estabilização no ganho de massa, que para as amostras de AGRC foi constatada aos 42 dias.

A curva de absorção de água para o primeiro minuto e ao longo do tempo foi obtida através das médias dos resultados das amostras ensaiadas nos procedimentos descritos nas etapas acima. Na Equação 1 e na Equação 2 estão, respectivamente, as fórmulas para o cálculo da taxa de absorção e da absorção de água percentual utilizadas na construção das curvas.

$$A_{\text{SUB}} = \frac{M_{\text{SUBF}} - M_{\text{SUBI}}}{M_{\text{SUBI}}} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$A_{\text{SUB}} (\%)$ = percentual de água absorvido pelo material submerso;

$M_{\text{SUB F}} (\text{g})$ = massa do material submerso no instante final;

$M_{\text{SUB I}} (\text{g})$ = massa do material submerso no instante inicial.

$$A_n = \frac{A_n}{A_F} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$A_n (\%)$ = absorção de água percentual no instante n;

$A_n (\text{g})$ = massa de água absorvida no instante n;

$A_F (\text{g})$ = massa de água absorvida ao final do ensaio.

As curvas de absorção do AGRC e AGN obtidas a partir dos procedimentos descritos nas etapas 1 e 2 podem ser observadas através do gráfico da Figura 13.

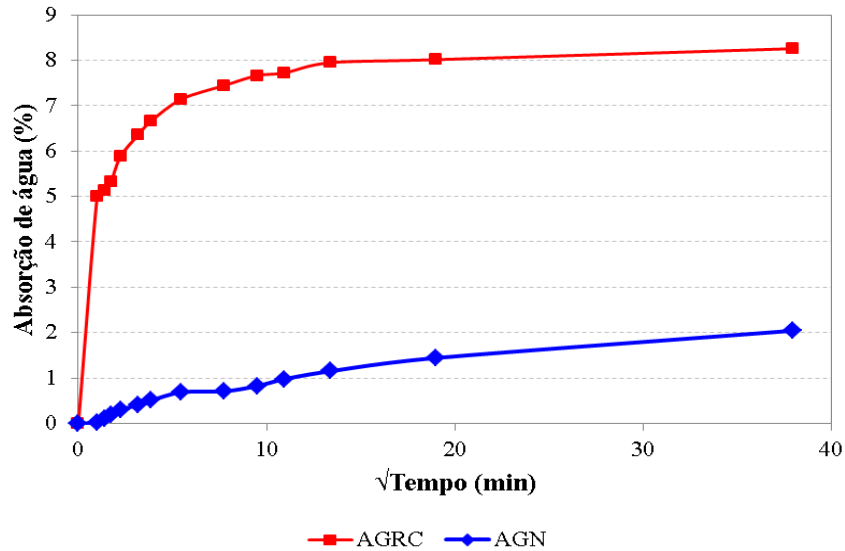


Figura 13 – Absorção por imersão dos AGN e AGRC ao longo do tempo.

3.2.5 Determinação do teor de argamassa aderida ao ARC

Para a determinação da quantidade de argamassa aderida ao AGRC empregou-se o método utilizado por Heineck (2012) onde a autora cita o método proposto por Ferreira (2007) acrescido de uma segunda etapa, proposta por Sanchez (2004).

De acordo com Ferreira (2007), é necessário aplicar um choque térmico às partículas, de modo a provocar tensões internas nos agregados (que auxiliam na desintegração e separação dos componentes). Para a execução do ensaio proposto pelo autor, utiliza-se 1 kg de AGRC da fração retida na peneira # 4,8 mm, seca em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ por um período de 24h ou até a constância da massa. A amostra é pesada e inserida em um forno mufla pré-aquecido à temperatura de 800°C , durante um período de aproximadamente 3 horas. Quando a amostra é retirada do forno, a mesma é imediatamente despejada sobre uma tela metálica, no interior de um tanque contendo água fria (Figura 14).



Figura 14 – Primeira etapa do ensaio para determinação do teor de argamassa aderida ao AGRC – choque térmico no AGRC.

Após o resfriamento do material, a amostra é retirada do tanque e o excesso de água é removido. A amostra então é inserida novamente na estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ onde permanece por mais 24h ou até que a massa esteja constante. Findo este período, a amostra é retirada da estufa, e após o resfriamento a mesma é envolta em um pano, para que com o auxílio de um martelo de borracha (tomando o cuidado para não quebrar os agregados naturais) provoque-se a desintegração agregado/argamassa (Figura 15). Após esta etapa, o material é peneirado de modo a eliminar a fração passante na peneira # 4,8 mm, e o restante da amostra é pesado.

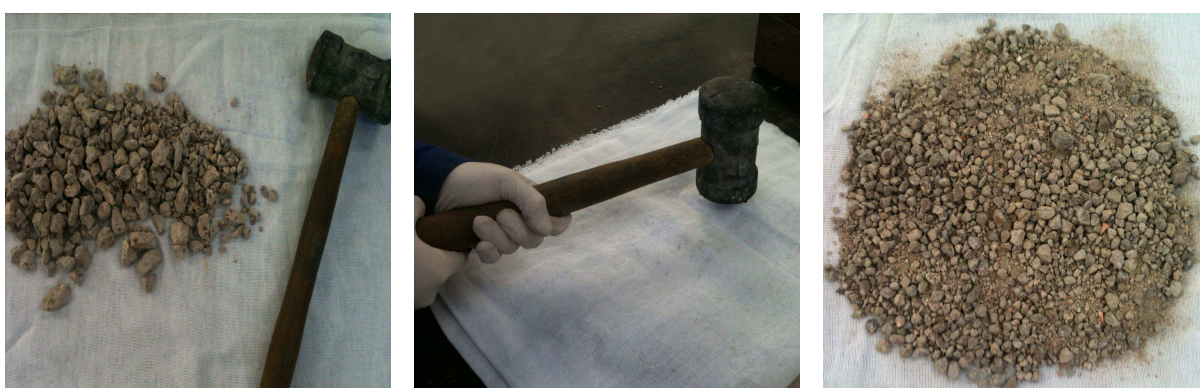


Figura 15 – Primeira etapa do ensaio para determinação do teor de argamassa aderida ao AGRC – desintegração do agregado/argamassa.

A segunda etapa descrita por Heineck (2012) foi executada de acordo com o método proposto por Sanchez (2004). O ensaio consiste na imersão da amostra obtida anteriormente (que ficou retida na peneira # 4,8 mm), em uma solução de ácido clorídrico, à temperatura ambiente. O ácido ocasiona a desintegração e separação da argamassa aderida ao agregado. Inicialmente a amostra foi submersa em ácido clorídrico P.A. por um período de 72h para que ocorra a dissociação do cimento e a dissolução da argamassa aderida aos grãos. Findo o período de imersão, a amostra é removida do ácido e lavada, utilizando-se uma peneira # 0,075 mm, que separa os agregados miúdos. A amostra é então seca em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24h, e então é resfriada. Por fim, realiza-se o peneiramento da amostra, onde é eliminada a fração passante na peneira # 4,8 mm. É registrada então, a massa final da amostra. A Figura 16 apresenta a amostra submersa em ácido e em seguida, seca em estufa após o ataque químico.



Figura 16 – Segunda etapa do ensaio para determinação do teor de argamassa aderida ao AGRC – imersão em ácido clorídrico e material após ataque químico.

A Tabela 14 apresenta os valores obtidos após o ensaio de choque térmico e ataque químico no AGRC.

Tabela 14 – Argamassa aderida no AGRC.

Choque térmico		
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa aderida (%)
1.000,0	406,84	59
Ataque químico		
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa aderida (%)
406,84	302,0	26

A partir dos resultados obtidos, é possível verificar que o AGRC utilizado possui aproximadamente 70% de argamassa aderida aos grãos, o que significa que aproximadamente 30% da composição do AGRC utilizado são agregados naturais. O teor de argamassa encontrado é elevado, porém, deve-se considerar que o concreto que originou o agregado é um concreto para peças pré-moldadas, com elevado teor de argamassa, em função do tipo de forma e da elevada taxa de armadura existente nas peças.

3.2.6 Água

Para a produção dos concretos, foi utilizada água proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de São Leopoldo, Rio Grande do Sul.

3.2.7 Aditivo superplastificante

O aditivo químico que foi incorporado às misturas é do tipo superplastificante, também conhecido como aditivo redutor de água, com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, tipo SP Glenium 51, da marca Basf. Segundo informações do fabricante, é isento

de cloretos e compatível com todos os cimentos que atendem a ASTM C 150. A Tabela 15 apresenta as características físico-químicas do aditivo que foi empregado na pesquisa, segundo as especificações do fabricante.

Neville (1997) afirma que um dos motivos da opção pela utilização de aditivos nas misturas é a capacidade de proporcionar ao concreto consideráveis melhoras físicas e econômicas, entre as quais está inclusa a utilização do aditivo em condições nas quais seria difícil ou até impossível a utilização de concretos sem a incorporação do mesmo. O aumento das propriedades mecânicas dos concretos produzidos com aditivo é usualmente proporcional à diminuição na relação água/cimento da mistura, geralmente ocasionado por uma velocidade maior de hidratação do cimento em um sistema bem disperso, os concretos contendo aditivo superplastificante podem apresentar, nas idades de 1, 3 e 7 dias, resistências até maiores do que os concretos de referência com a mesma relação água/cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Tabela 15 – Características físico-químicas do aditivo superplastificante.

Propriedades físico-químicas	
Função principal	Superplastificante (3º geração)
Base química	Policarboxilatos
Estado físico	Líquido
Aspecto	Bege
Densidade	1,067 a 1,107 g/cm ³
pH	5 a 7
Sólidos	28,5 a 31,5 %
Viscosidade	95 a 159 centipoises

Fonte: Fabricante (2012).

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Para a dosagem experimental utilizou-se o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), fixando como parâmetro de controle o valor do abatimento do tronco de cone, que para este estudo foi de 100 ± 20 mm. Inicia-se o método através do traço intermediário, ajustando-se o teor de argamassa. Para a determinação do teor ideal de argamassa foi utilizado o traço inicial de 1:5 em massa. De acordo com o ajuste, foi determinado o teor ideal de argamassa de 54%, que resultou em uma quantidade de água $H = 9,2\%$. A partir deste traço são moldados três corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão.

Em seguida, são executados mais dois traços auxiliares do estudo de dosagem, empregando-se o teor de argamassa ajustado no traço intermediário, um mais pobre (1:6,5) e o outro mais rico (1:3,5) em consumo de cimento, dos quais são moldados mais três corpos de prova de cada traço para a determinação da resistência à compressão, e com os resultados dos três pontos, é então elaborado o diagrama de dosagem. Os testes de dosagem dos concretos assim como os ensaios designados a esta pesquisa foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) - Unisinos.

3.3.1 Definição dos traços dos concretos de referência e dos concretos com AGRC

A partir do diagrama de dosagem, foram estabelecidos os traços dos concretos de referência. Determinados os concretos de referência, foram definidos os traços unitários para cada teor de pré-molhagem estabelecido e então, foram calculadas as quantidades de materiais utilizados nas misturas.

Devido à alta absorção de água apresentada pelo agregado reciclado designado à pesquisa, assim como observado através dos dados apresentados durante a revisão da literatura, optou-se pela realização de uma pré-molhagem do AGRC, em diferentes percentuais, previamente à mistura, conforme descrito a seguir.

3.3.2 Pré-molhagem do AGRC

Conforme apresentado na revisão, a pré-molhagem do ARC pode ser realizada de diferentes formas, e esta consiste em permitir que a absorção de água pelo ARC ocorra antes de sua incorporação na mistura, buscando evitar que o agregado reciclado incorpore a água destinada à mistura do concreto. Porém, ao analisar-se o método proposto por Werle (2010) nesta instituição, no qual a água destinada à pré-molhagem é aspergida sobre os agregados reciclados e os mesmos são misturados manualmente, este não se apresenta eficiente, pois o método não assegura uma molhagem uniforme aos agregados. Decidiu-se então, neste estudo, propor uma nova forma para a execução da pré-molhagem do AGRC, e a descrição deste procedimento encontra-se a seguir.

Nesta pesquisa, foram estabelecidos diferentes níveis de pré-molhagem do AGRC, de: 40, 60, 80 e 100%. A pré-molhagem do agregado reciclado é realizada individualmente para a quantidade de material estabelecido para cada traço de concreto definido, e os equipamentos necessários para a realização deste ensaio são: balança com precisão de 0,01 g, e capacidade compatível com a massa a determinar; recipientes plásticos com tampa de rosca (de modo a evitar a perda da umidade); fita adesiva de alta resistência

(tape) e borrifador. O procedimento é realizado em sala com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $60 \pm 10\%$. Apesar do valor da umidade ser relativamente baixo, esta era a única sala com controle de umidade disponível e procurou-se trabalhar com tempo sempre inferior a 5 minutos, de modo a minimizar eventuais perdas de água por evaporação.

A quantidade necessária de AGRC seco, estabelecida para cada traço de concreto, é então pesada, do mesmo modo é pesada a quantidade de água relativa a cada teor de saturação estabelecido. Com o auxílio de um borrifador, a água de pré-molhagem determinada para cada traço é então aspergida, em partes, para amostras pequenas de AGRC que vão sendo despejadas no recipiente plástico, a pré-molhagem é realizada diretamente no interior do recipiente plástico, de modo a evitar perdas. Ao final da execução da pré-molhagem, o recipiente plástico é tampado e vedado com fita adesiva de alta resistência, onde permanece durante o período de 7 dias, até o momento da mistura. O procedimento de pré-molhagem pode ser observado na Figura 17.



Figura 17 – Procedimento de pré-molhagem.

A alternativa de manter a amostra saturada armazenada em recipientes vedados, além de evitar a perda de umidade da amostra, induz à redistribuição da umidade interna, em relação às bordas do agregado, ou seja, ocorre uma migração da umidade que está no meio do agregado pela diferença de concentração, em direção às bordas mais secas da amostra. Para

que esta redistribuição de umidade ocorra de forma satisfatória no agregado, durante o período estipulado de 7 dias, os recipientes foram agitados e revolvidos a cada 24 horas.

Determinação do volume de compensação de agregados: Para a substituição do percentual de 50% de AGN por AGRC, foi realizada uma compensação no volume de agregados, em busca de amenizar o fato de que a massa específica dos agregados reciclados é inferior à dos agregados naturais, e uma substituição simples, em massa, resultaria em maiores volumes de agregados reciclados, o que demandaria mais água e cimento, a fim de produzir misturas equivalentes. O cálculo para a compensação, em volume, dos agregados foi realizado de acordo com a Equação 3.

$$M_{AGRC} = M_{AGN} \times \frac{\gamma_{AGRC}}{\gamma_{AGN}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

M_{AGRC} (kg) = massa de AGRC a ser utilizada;

M_{AGN} (kg) = massa de AGN inicialmente utilizada;

γ_{AGN} (kg/dm³) = massa específica do AGN;

γ_{AGRC} (kg/dm³) = massa específica do AGRC.

Determinação da água de pré-molhagem: O cálculo dos percentuais de água estabelecidos para a realização da pré-molhagem das amostras foi efetuado utilizando-se a taxa de absorção obtida para o AGRC, correspondente ao período de 24 horas, através do ensaio de absorção de água ao longo do tempo (item 3.2.4), onde a taxa de absorção obtida no ensaio para o tempo referido foi de 8,26%. Através desta, foram calculados os percentuais de pré-molhagem definidos para a pesquisa, de acordo com a porcentagem de água que seria absorvida pelo agregado reciclado correspondente às misturas, conforme a Equação 4.

$$H_2O_{PM} = M_{AGRC} \times \left(\frac{A_{24}}{100} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

H_2O_{PM} (kg) = água de pré-molhagem;

M_{AGRC} (kg) = massa de AGRC a ser utilizada;

A_{24} (kg) = percentual de água absorvido pelo AGRC em 24 horas.

3.3.3 Traços dos concretos de referência

A finalidade do concreto de referência, elaborado com a incorporação de agregado natural, é a de servir como amostra para a comparação em relação aos concretos elaborados com agregado reciclado de concreto.

Em busca de obter os objetivos estipulados para a pesquisa, foram estabelecidas variáveis fixas para a dosagem do concreto de referência, permitindo, assim, que possam ser avaliadas as influências que exercem sobre os fatores de resposta estabelecidos (3.1.2). São elas:

- a) Relação a/c inicial: 0,45; 0,55 e 0,65
- b) Teor de argamassa: $\alpha = 0,54$
- c) Abatimento: 100 ± 20 mm

3.3.4 Traços dos concretos sem aditivo

Os concretos desenvolvidos através da incorporação de agregado reciclado de concreto, sem a utilização de aditivo, foram produzidos com as mesmas variáveis fixas determinadas aos concretos de referência (produzido com abatimento de 100 ± 20 mm, que resultou num teor de água total de 9,2 %), com exceção da taxa de substituição de parte do AGN por AGRC; fixada em 50%, e da consequente alteração do teor de água total para manutenção da trabalhabilidade estipulada. Para o AGRC foram estabelecidos os percentuais de pré-molhagem na ordem de 40, 60, 80 e 100% da água relativa à absorção total do resíduo. Após a mistura do AGRC ao concreto, foi realizada uma compensação de água no teor necessário para atingir o abatimento de 100 ± 20 mm.

3.3.5 Traços dos concretos com AGRC com aditivo

Ao final da produção dos concretos com AGRC sem aditivo, a menor quantidade de água utilizada na produção destes (verificada nos concretos com teor de pré-molhagem de 100%) foi fixada para a produção dos concretos com AGRC com aditivo. Os concretos produzidos com AGRC e aditivo foram produzidos com as mesmas variáveis fixas estipuladas para os concretos reciclados sem aditivo, e foram utilizadas as taxas de saturação na ordem de

40, 60 e 80%. Para compensar a eventual perda de abatimento dos concretos em função da utilização de agregados reciclados de concreto, foi incorporado aditivo superplastificante com as características físico-químicas descritas na Tabela 15, ao invés de água nas misturas, de forma a alcançar o abatimento proposto.

Foram reproduzidos novamente os concretos de referência, somente com AGN, utilizando-se o novo teor de água fixado para as misturas com aditivo ($H = 9,74\%$) e acrescentando aditivo superplastificante ao invés de água para que fosse atingido o abatimento fixado.

3.3.6 Ordem de mistura dos materiais

A produção dos concretos com AGRC foi baseada nos traços dosados experimentalmente. Foram produzidos 15 traços utilizando-se água e 12 traços utilizando-se aditivo superplastificante para a correção do abatimento, totalizando 27 traços diferentes. Os traços empregados, assim como as quantidades de materiais utilizados nas misturas, estão relacionados na Tabela 16 e Tabela 17. É importante observar, que na Tabela 17, não é apresentado o concreto produzido com AGRC e aditivo, utilizando-se um nível de 100% de pré-molhagem, pois o abatimento inicial fixado não tornou possível a reprodução deste teor de pré-molhagem.

A ordem de inserção dos materiais na betoneira foi realizada conforme procedimentos adotados no projeto onde a pesquisa está inserida, e esta passa a ser a ordem adotada pelo grupo GMAT da Unisinos. O procedimento é descrito na Figura 18.

Esta ordem é:

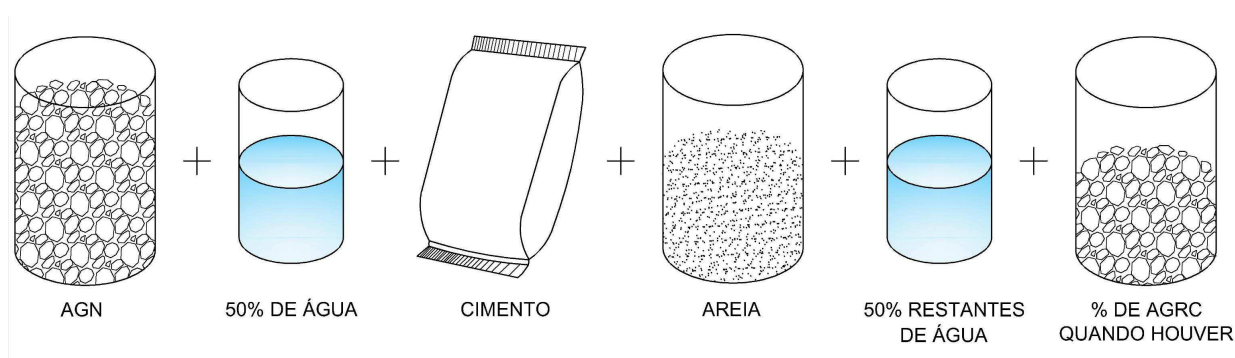


Figura 18 – Ordem de inserção dos materiais na betoneira.

O índice de consistência do concreto foi verificado em cada sequência de mistura de materiais através do ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme ABNT NBR NM

67:1998, com o objetivo de verificar e garantir a mesma trabalhabilidade às misturas, e a correção do abatimento foi efetuada com água ou através do uso de aditivo.

Tabela 16 – Quantidades de materiais e traços empregados nas misturas para os concretos sem aditivo.

Sigla	Traço (c:a:p)	Relação a/c inicial	% AGRC	Teor de Saturação (%)	Quantidades (kg)					Aditivo (g)	Água PM (g)	Água total (kg)	H total (%)	Relação a/c final	Abatimento Inicial (mm)
					Cimento	Areia	AGN	AGRC	Água (mistura)						
Concretos de Referência															
T01-45 REF	1 : 1,641 : 2,25	0,45	0	0	8,888	14,577	20,00		3,999		3,999	9,20	0,45	100	
T02-55 REF	1 : 2,228 : 2,75	0,55	0	0	7,272	16,218	20,00		3,999		3,999	9,20	0,55	100	
T03-65 REF	1 : 2,815 : 3,25	0,65	0	0	6,154	17,354	20,00		3,999		3,999	9,20	0,65	100	
Concretos com 40% PM															
T40-45	1 : 1,641 : 2,25	0,45	50	40	8,888	14,577	10,00	8,897	4,456		293,956	4,750	11,21	0,55	100
T40-55	1 : 2,228 : 2,75	0,55	50	40	7,272	16,218	10,00	8,897	4,289		293,956	4,583	10,81	0,65	95
T40-65	1 : 2,815 : 3,25	0,65	50	40	6,154	17,354	10,00	8,897	4,270		293,956	4,563	10,76	0,76	95
Concretos com 60% PM															
T60-45	1 : 1,641 : 2,25	0,45	50	60	8,888	14,577	10,00	8,897	4,078		440,935	4,519	10,66	0,52	100
T60-55	1 : 2,228 : 2,75	0,55	50	60	7,272	16,218	10,00	8,897	4,039		440,935	4,480	10,57	0,63	100
T60-65	1 : 2,815 : 3,25	0,65	50	60	6,154	17,354	10,00	8,897	4,079		440,935	4,519	10,65	0,75	90
Concretos com 80% PM															
T80-45	1 : 1,641 : 2,25	0,45	50	80	8,888	14,577	10,00	8,897	3,914		587,913	4,502	10,62	0,52	105
T80-55	1 : 2,228 : 2,75	0,55	50	80	7,272	16,218	10,00	8,897	3,881		587,913	4,469	10,54	0,63	110
T80-65	1 : 2,815 : 3,25	0,65	50	80	6,154	17,354	10,00	8,897	3,806		587,913	4,394	10,36	0,73	95
Concretos com 100% PM															
T100-45	1 : 1,641 : 2,25	0,45	50	100	8,888	14,577	10,00	8,897	3,834		734,892	4,569	10,78	0,53	95
T100-55	1 : 2,228 : 2,75	0,55	50	100	7,272	16,218	10,00	8,897	3,798		734,892	4,532	10,69	0,64	100
T100-65	1 : 2,815 : 3,25	0,65	50	100	6,154	17,354	10,00	8,897	3,820		734,892	4,555	10,74	0,76	90

Tabela 17 – Quantidades de materiais e traços empregados nas misturas para os concretos com aditivo.

Sigla	Traço (c:a:p)	Relação a/c	% AGRC	Teor de Saturação (%)	Quantidades (kg)					Aditivo (g)	Água PM (g)	Água total (kg)	H total (%)	Relação a/c final	Abatimento Inicial (mm)
					Cimento	Areia	AGN	AGRC	Água (mistura)						
Concretos de Referência com aditivo															
T01-45A REF	1 : 1,641 : 2,25	0,43	0	0	8,888	14,577	20,00		3,798	6,4		3,802	8,74	0,43	100
T02-55A REF	1 : 2,228 : 2,75	0,52	0	0	7,272	16,218	20,00		3,798	7,7		3,803	8,74	0,52	100
T03-65A REF	1 : 2,815 : 3,25	0,62	0	0	6,154	17,354	20,00		3,798	3,5		3,800	8,74	0,62	100
Concretos com 40% PM com aditivo															
T40-45A	1 : 1,641 : 2,25	0,43	50	40	8,888	14,577	10,00	8,897	3,798	19,4	293,956	4,105	9,68	0,47	90
T40-55A	1 : 2,228 : 2,75	0,52	50	40	7,272	16,218	10,00	8,897	3,798	14,8	293,956	4,102	9,67	0,57	95
T40-65A	1 : 2,815 : 3,25	0,62	50	40	6,154	17,354	10,00	8,897	3,798	18,0	293,956	4,104	9,67	0,68	110
Concretos com 60% PM com aditivo															
T60-45A	1 : 1,641 : 2,25	0,43	50	60	8,888	14,577	10,00	8,897	3,798	14,7	440,935	4,249	10,03	0,49	100
T60-55A	1 : 2,228 : 2,75	0,52	50	60	7,272	16,218	10,00	8,897	3,798	11,9	440,935	4,247	10,02	0,60	90
T60-65A	1 : 2,815 : 3,25	0,62	50	60	6,154	17,354	10,00	8,897	3,798	9,4	440,935	4,245	10,02	0,71	105
Concretos com 80% PM com aditivo															
T80-45A	1 : 1,641 : 2,25	0,43	50	80	8,888	14,577	10,00	8,897	3,798	24,5	587,913	4,403	10,38	0,51	110
T80-55A	1 : 2,228 : 2,75	0,52	50	80	7,272	16,218	10,00	8,897	3,798	19,3	587,913	4,399	10,37	0,62	90
T80-65A	1 : 2,815 : 3,25	0,62	50	80	6,154	17,354	10,00	8,897	3,798	20,0	587,913	4,399	10,37	0,73	90

3.3.7 Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova

Após a obtenção dos traços de concreto estabelecidos, realizaram-se moldagens de corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 10 x 20 cm (concreto), para o ensaio de compressão axial e absorção de água por capilaridade, e nas dimensões de 2,5 x 5 cm (argamassas equivalentes) para a análise de sua porosidade.

Os corpos de prova de concreto foram moldados de acordo com os procedimentos da norma ABNT NBR 5738:2003, com adensamento mecânico, preenchidos em uma única camada e adensados por 10 segundos cada. Estes permaneceram nos moldes à temperatura e umidade ambiente por 24 horas, com o topo protegido por placas de vidro, a fim de evitar a perda de água pela superfície externa. Decorrido este período, as amostras foram desmoldadas, identificadas e submetidas ao processo de cura.

O procedimento de cura adotado para todas as amostras de concreto foi o de cura submersa, o qual segue as determinações da norma NBR 5738:2003 e constitui um fator fixo no programa experimental. A cura foi realizada em tanques com solução saturada de água e cal, em uma câmara úmida, durante um período de 28 dias, idade da realização dos ensaios de compressão axial e absorção por capilaridade.

A argamassa foi extraída do concreto através da utilização de uma peneira # 4,8 mm e auxílio de uma mesa vibratória (Figura 19). A moldagem dos corpos de prova de argamassa foi executada através de adensamento manual, preenchendo o molde em 2 camadas e adensando os mesmos com haste metálica compatível com o seu tamanho, com 10 golpes em cada camada. Imediatamente após a moldagem, as amostras de argamassa foram tampadas e inseridas em embalagem impermeável selada, de forma a evitar a perda de umidade para o meio externo. As embalagens contendo as amostras foram armazenadas em sala com temperatura e umidade controladas ($T = 23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 60 \pm 10\%$), onde permaneceram intocados durante o período de cura estipulado de 3 dias. A Figura 19 apresenta o procedimento empregado para a moldagem das amostras de argamassa.



Figura 19 – Etapas da moldagem das amostras de argamassa.

Foram moldados 4 exemplares de argamassa, extraída do concreto a cada um dos tempos onde foi determinada a consistência deste concreto (10, 30, 60, 90 e 120 minutos), totalizando 20 amostras de argamassa para cada um dos concretos produzidos.

3.4 PROPRIEDADES AVALIADAS NOS CONCRETOS PRODUZIDOS

Na sequência serão apresentados os métodos de ensaio utilizados para cada propriedade avaliada na pesquisa.

Depois de realizada a caracterização da matéria prima definida e após serem executadas as dosagens dos concretos, e ensaios no estado fresco, foram moldados os corpos de prova de todos os diferentes traços estipulados nos itens 3.3.3, 3.3.4 e 3.3.5 e estes foram submetidos à cura conforme especificações da norma ABNT NBR 5738:2003. Após a cura, os corpos de prova foram então ensaiados na idade de 28 dias através da metodologia experimental apontada a seguir.

3.4.1 Trabalhabilidade

A determinação da consistência do concreto foi avaliada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, método universalmente adotado por sua extrema simplicidade e rapidez de execução, conhecido popularmente como *slump* e normatizado pela ABNT NBR NM 67:1998, vigente à época da realização do ensaio. Este procedimento foi realizado para todos os traços de concreto de forma a avaliar a trabalhabilidade dos mesmos.

O ensaio de abatimento de tronco de cone foi realizado estipulando-se um abatimento de 100 ± 20 mm (segundo a norma ABNT NBR NM 67:1998, vigente à época da realização do ensaio) e quando o mesmo foi atingido, foram realizados ensaios para determinar a perda de abatimento ao longo do tempo. Os tempos definidos foram: 10, 30, 60,

90, 120 minutos. Durante os intervalos de tempo, o misturador contendo o concreto fresco foi coberto com panos úmidos, de forma a evitar a evaporação da água presente na mistura.

Mesmo considerando que a norma em vigor atualmente, ABNT NBR NM 10342:2012 aumentou os limites de aceitação do ensaio para 100 ± 20 mm, procurou-se manter o menor erro possível, visto que as diferentes quantidades de água não interferiram nas propriedades avaliadas nesta pesquisa.

3.4.2 Resistência à compressão aos 28 dias

Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados conforme a norma ABNT NBR 5739:2007. Foram ensaiados 3 corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, aos 28 dias, para cada teste de compressão e para cada traço de concreto produzido. Estas amostras receberam capeamento com enxofre, para que sua superfície fosse regularizada. A prensa utilizada para o ensaio foi uma prensa classe I, da marca *Controls*, com capacidade de 2000 KN. Para os corpos de prova produzidos na pesquisa, foi adotada como resistência de cada concreto, a média resultante dos ensaios de 3 corpos de prova.

3.4.3 Absorção de água por capilaridade

A determinação de absorção de água por capilaridade dos concretos foi baseada nas recomendações de RILEM TC 116 PCD (1999). Foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura; estes foram divididos em 5 fatias. Foram excluídas as fatias da região superior e inferior dos mesmos, e então foi determinada uma média, em relação à absorção, entre as 3 fatias da região central de cada corpo de prova. Foram aferidos 3 diâmetros de cada fatia, e então calculada uma média que foi utilizada no cálculo para a determinação da absorção capilar (g/cm^2). O esquema de preparação das amostras está representado na Figura 20.

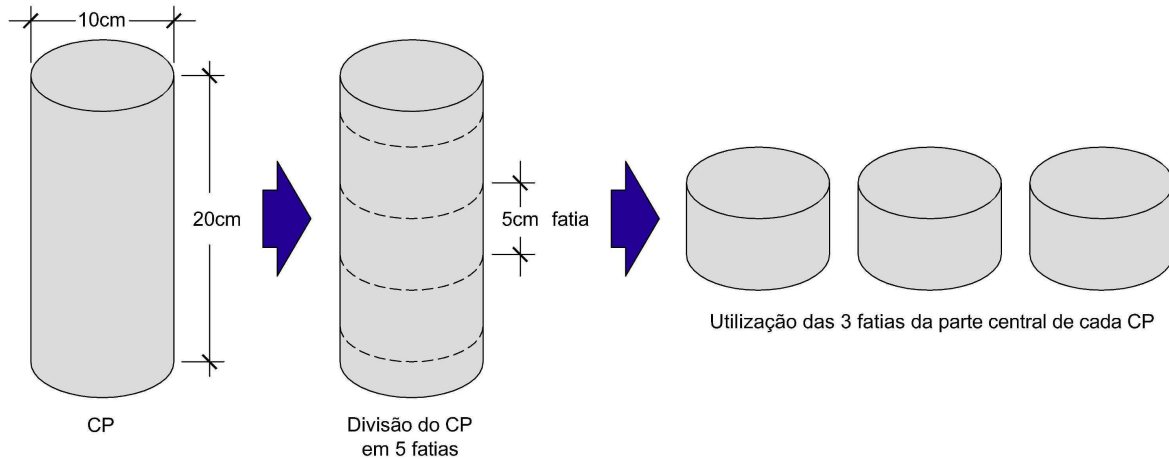


Figura 20 – Representação esquemática da preparação das amostras para ensaio de absorção de água por capilaridade.

As amostras foram condicionadas em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, até a estabilização da massa; e após serem removidas da estufa, permaneceram em um dessecador com sílica gel até atingirem a temperatura ambiente, em recinto com umidade e temperatura controladas ($23 \pm 2^\circ\text{C}$; $60 \pm 10\%$). Quando retiradas do dessecador, a superfície superior da amostra foi vedada com um balão de látex, evitando assim que ocorresse influência da umidade externa na face superior da mesma. E para garantir a absorção de água unilateral, a superfície lateral das amostras foi recoberta com fita adesiva de alta resistência, de maneira a tornar a face impermeável.

Em seguida, a superfície inferior permaneceu em contato com uma lâmina de água, até uma profundidade máxima de 3 mm. O nível da água permanece constante através de fluxo contínuo de água e recipiente com extravasor, conforme pode ser visualizado na Figura 21, a qual apresenta o sistema experimental proposto por RILEM (1999).

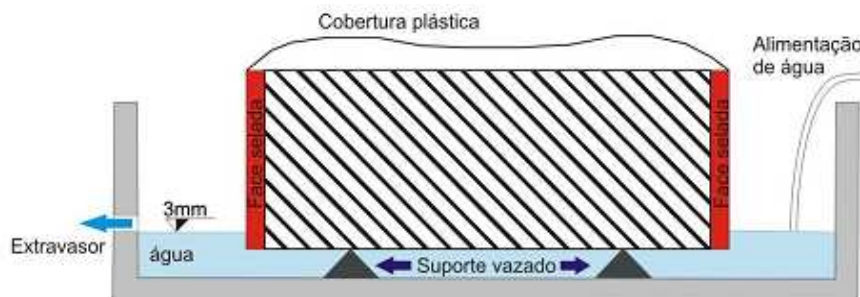


Figura 21 – Esquema experimental utilizado por RILEM (1999).

Fonte: Rilem (1999) adaptado por Troian (2010).

O acréscimo de massa foi acompanhado através de pesagem das amostras nos seguintes intervalos de tempo: 1, 2, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos. O tempo máximo de absorção foi definido tendo-se em vista que os resultados encontrados na literatura apresentaram uma taxa significativa de absorção por capilaridade até aproximadamente a primeira hora de execução do ensaio. Para o registro do peso, as amostras foram retiradas da água e secas superficialmente com pano úmido em busca de remover o excesso de água, de modo que a superfície permanecesse úmida. A água de absorção foi registrada e calculada para cada intervalo de tempo por unidade de área da superfície de ensaio conforme a Equação 5.

$$W(t) = m(t) - m_0 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$W(t)$ = diferença de massa do corpo de prova no tempo considerado;

$m(t)$ = massa do corpo de prova no tempo considerado;

m_0 = massa inicial do corpo de prova.

Para a execução do ensaio, foram utilizadas bandejas plásticas, com fundo plano, onde foi inserido um estrado vazado, de forma a possibilitar o avanço da água até as amostras. O abastecimento de água, através de um fluxo contínuo, é viabilizado pela utilização de um suporte para água, conforme pode ser visualizado na Figura 22.



Figura 22 – Etapas do ensaio de absorção de água por capilaridade.

3.5 ARGAMASSAS EXTRAÍDAS DOS CONCRETOS

Na sequência são apresentados os métodos de ensaio utilizados para as argamassas extraídas dos concretos produzidos.

3.5.1 Alteração do volume de vazios da argamassa em função do tempo de contato com o ARC

Após o período de cura estabelecido para as amostras de argamassa (Figura 23), estas foram desmoldadas em sala com temperatura e umidade controladas ($23 \pm 2^\circ\text{C}$; $60 \pm 10\%$), pesadas (massa saturada), identificadas (Figura 24) e submetidas à secagem em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, durante 24 horas. Quando retiradas da estufa, as mesmas foram resfriadas em dessecador contendo sílica gel e após o resfriamento, sua massa seca foi determinada, também foi verificada a altura e diâmetro de cada amostra com o auxílio de um paquímetro digital. Ao término das etapas descritas, as amostras retornaram ao dessecador, onde permaneceram até o momento da realização dos demais ensaios.



Figura 23 – Amostras de argamassa após o período de cura estabelecido.



Figura 24 – Amostras de argamassa desmoldadas e identificadas.

As massas das amostras secas e saturadas, assim como a média de 3 medidas referentes ao diâmetro e altura das amostras, foram dados obtidos para a realização do cálculo do volume de vazios destas amostras. A quantidade de vazios de cada uma das 4 amostras de argamassa produzidas em cada intervalo de tempo foi calculada conforme a Equação 6. Após a realização do cálculo, foi determinada uma média, em relação ao volume de vazios, entre as 4 amostras de cada intervalo de tempo.

$$V = \frac{M_{\text{saturada}} - M_{\text{seca}}}{\text{Volume}}$$

Equação 6

Onde:

$V(\text{g/cm}^3)$ = volume total de vazios da amostra;

$M_{\text{saturada}}(\text{g})$ = massa saturada (inicial) da amostra de argamassa;

$M_{\text{seca}}(\text{g})$ = massa seca (final) da amostra de argamassa;

$\text{Volume}(\text{cm}^3)$ = volume da amostra de argamassa.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados, em atendimento aos objetivos traçados na pesquisa, para cada variável de resposta. A análise e discussão dos resultados são acompanhadas da análise estatística, onde a ferramenta adotada é a Análise de Variância (ANOVA), a qual aponta se há significância para as variáveis escolhidas individualmente, assim como possíveis interações entre as variáveis frente aos resultados obtidos.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CONCRETOS PRODUZIDOS

Os resultados dos ensaios realizados para todos os traços de concreto produzidos, no estado fresco (abatimento ao longo do tempo) e endurecido (ensaios mecânicos e de durabilidade) são apresentados a seguir.

4.1.1 Trabalhabilidade

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos para os concretos produzidos com AGRC, com diferentes níveis de pré-molhagem, com ou sem a utilização de aditivo, assim como os seus concretos de referência produzidos com AGN. Os dados obtidos foram tratados estatisticamente e os resultados são apresentados na sequência.

Concretos produzidos com AGRC sem aditivo:

A Tabela 18 apresenta os teores de água utilizados nos traços dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo e nos seus concretos de referência, produzidos com AGN sem aditivo, onde estão relacionados à relação água/cimento inicial e relação água/cimento final da mistura, assim como o teor de água inicial da mistura, o teor de água existente no AGRC em função da pré-molhagem, e o teor total de água existente no traço, após a mistura com o AGRC.

Para esta pesquisa, utilizaram-se as seguintes denominações:

- Relação a/c inicial: quantidade de água existente na argamassa, antes da adição de AGRC;

- Relação a/c final: soma da relação a/c inicial com a água existente no AGRC em função da pré-molhagem, mais a quantidade de água necessária ou a porcentagem de água presente no aditivo, utilizada para corrigir o abatimento, uma vez que a água existente no AGRC não compensa o abatimento.

Deve-se levar em consideração que a relação a/c “real”, ou seja, a correspondente à quantidade de água da argamassa é desconhecida, pois não se sabe como ocorre a migração de água entre a argamassa e o AGRC, e esta quantidade de água se altera constantemente em cada traço. Neste trabalho, adotou-se para fins de análise estatística dos resultados, a relação a/c inicial, em função de que em trabalhos anteriores (TROIAN, 2010; WERLE, 2010; CAVALHEIRO 2010, GONÇALVES, 2011) não foi observada relação significativa entre a relação a/c final e a resistência à compressão dos concretos, e da relação a/c inicial apresentar uma razoável relação com os resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos.

Tabela 18 – Relação água/cimento e teor de água – concretos com AGRC sem aditivo e seus concretos de referência.

PM (%)	Relação a/c inicial	H (%) mistura REF	H (%) adicionada	H (%) PM	H (%) total	Relação a/c final
0	0,45	9,20			9,20	0,45
	0,55	9,20			9,20	0,55
	0,65	9,20			9,20	0,65
40	0,45	9,20	1,32	0,69	11,21	0,55
	0,55	9,20	0,92	0,69	10,81	0,65
	0,65	9,20	0,87	0,69	10,76	0,76
60	0,45	9,20	0,42	1,04	10,66	0,52
	0,55	9,20	0,33	1,04	10,57	0,63
	0,65	9,20	0,41	1,04	10,65	0,75
80	0,45	9,20	0,04	1,38	10,62	0,52
	0,55	9,16		1,38	10,54	0,63
	0,65	8,98		1,38	10,36	0,73
100	0,45	9,05		1,73	10,78	0,53
	0,55	8,96		1,73	10,69	0,64
	0,65	9,01		1,73	10,74	0,76

Onde: PM = teor de pré-molhagem; H = teor de água total (%).

Nos concretos produzidos com AGRC nota-se que a quantidade de água da argamassa é corrigida após a mistura do AGRC, o que resulta no acréscimo da relação a/c. Em função da movimentação de água entre a argamassa e o agregado já estar ocorrendo no momento desta mistura, optou-se por não alterar o valor da relação a/c inicial.

Conforme exposto na Tabela 18, em todos os traços produzidos nesta pesquisa, o teor de água final (água existente na mistura do concreto de referência + água de pré-molhagem incorporada ao AGRC + água necessária para atingir o abatimento, fixado em 100 ± 20 mm) necessário para compensar a absorção de água do AGRC, difere do teor de água inicial, que corresponde ao teor de água do concreto de referência e que deu origem à

denominação de cada traço de concreto produzido. Porém, para que os dados apresentados nesta pesquisa sejam facilmente interpretados, cada traço de concreto é identificado em função de sua relação água/cimento inicial.

Ao realizar uma comparação das relações a/c finais dos concretos de referência, produzidos com AGN, em relação aos valores das relações a/c finais dos concretos produzidos com AGRC, após a inserção do agregado reciclado às misturas e correção do abatimento dos mesmos, é possível observar um aumento do teor de água presente nos concretos produzidos com AGRC, o que é consequência de uma maior demanda da quantidade de água para que o abatimento estabelecido fosse atingido.

Observa-se também, através da Tabela 18, que o aumento do teor de pré-molhagem resulta na necessidade de uma menor quantidade de água na mistura para que o abatimento especificado seja atingido. É possível afirmar ainda, que existe uma correlação entre a diminuição no teor de água da mistura e a quantidade de água de pré-molhagem utilizada, o que resulta em um H total similar para todos os traços de concreto produzidos. Também podem ser verificadas perdas de abatimento similares para estes concretos (dentro do limite de tolerância para o ensaio).

Na Tabela 19 são apresentados os valores do ensaio de abatimento ao longo do tempo, obtidos para os concretos produzidos com AGRC, sem a utilização de aditivo e seus concretos de referência, produzidos com AGN.

Tabela 19 – Abatimento ao longo do tempo – concretos produzidos com AGRC sem aditivo e seus concretos de referência, produzidos com AGN.

PM (%)	Tempo (min)	Abatimento (mm)		
		T01-45 REF	T02-55 REF	T03-65 REF
0	10	100	100	100
	30	70	75	75
	60	45	50	50
	90	30	35	35
	120	20	25	30
		T40-45	T40-55	T40-65
40	10	100	95	95
	30	80	70	70
	60	60	60	50
	90	45	45	40
	120	35	30	20
		T60-45	T60-55	T60-65
60	10	100	100	90
	30	75	70	65
	60	65	55	55
	90	55	45	40
	120	40	35	35
		T80-45	T80-55	T80-65
80	10	105	110	95
	30	85	90	80
	60	60	75	65
	90	45	55	55
	120	35	45	40
		T100-45	T100-55	T100-65
100	10	95	100	90
	30	70	70	65
	60	55	50	45
	90	35	40	35
	120	30	25	25

Onde: PM = teor de pré-molhagem.

É possível inferir que para os concretos produzidos sem a utilização de aditivo, os valores obtidos no ensaio de abatimento ao longo do tempo foram similares para os três traços apresentados, o que pode ser justificado através dos valores totais de H similares entre estes traços (Tabela 18). O valor para o H total (considerando o somatório de H presente no AGRC mais o adicionado à mistura apresenta-se similar para todos os teores de pré-molhagem.

Ao analisar os resultados obtidos na Tabela 19, para os concretos produzidos com AGRC sem aditivo, e comparando estes com seus concretos de referência, verifica-se que os valores apresentados para o abatimento nos primeiros 30 minutos de ensaio são similares para ambos, com exceção dos concretos com AGRC produzidos com um nível de 80% de pré-

molhagem, os quais sofreram uma perda menor de abatimento até o tempo final do ensaio. Avaliando-se o comportamento dos concretos ao longo do tempo, observa-se que o aumento do teor de pré-molhagem, até 80%, resulta em uma menor perda de abatimento, (vide Figura 25) embora esta seja pouco expressiva (e esteja dentro do limite de variação tolerado para o ensaio, de ± 20 mm).

Ainda analisando a Tabela 19, é possível afirmar também que a utilização de AGRC com níveis de 40 a 80% de pré-molhagem apresentam uma menor perda de abatimento a partir dos 60 minutos de ensaio.

Concretos produzidos com AGRC com aditivo:

A Tabela 20 apresenta os teores de água utilizados nos traços dos concretos produzidos com AGRC com aditivo e nos seus concretos de referência, produzidos com AGN com aditivo.

Tabela 20 – Relação água/cimento e teor de água – concretos com AGRC com aditivo e seus concretos de referência.

PM (%)	Relação a/c inicial	H (%) mistura	H (%) PM	Água existente no aditivo (%)	H (%) total	Relação a/c final
0	0,43	8,96		1,92	8,74	0,43
	0,52	8,96		2,31	8,74	0,52
	0,62	8,96		1,05	8,74	0,62
40	0,43	8,96	0,69	5,82	9,68	0,47
	0,52	8,96	0,69	4,44	9,67	0,57
	0,62	8,96	0,69	5,4	9,67	0,68
60	0,43	8,96	1,04	4,41	10,03	0,49
	0,52	8,96	1,04	3,57	10,02	0,60
	0,62	8,96	1,04	2,82	10,02	0,71
80	0,43	8,96	1,38	7,35	10,38	0,51
	0,52	8,96	1,38	5,79	10,37	0,62
	0,62	8,96	1,38	6,0	10,37	0,73

Onde: PM = teor de pré-molhagem; H = teor de água total (%).

Em função da pré-molhagem dos agregados, os concretos com AGRC produzidos com aditivo superplastificante apresentam uma elevação da relação a/c final em relação aos seus concretos de referência (PM = 0%). Esta elevação também ocorreu nos concretos sem aditivo, porém de modo mais expressivo, devido ao acréscimo de água ocorrido durante a mistura.

Na Tabela 21 são apresentados os valores do ensaio de abatimento ao longo do tempo, obtidos para os concretos produzidos com AGRC com a utilização de aditivo e seus concretos de referência, produzidos com AGN.

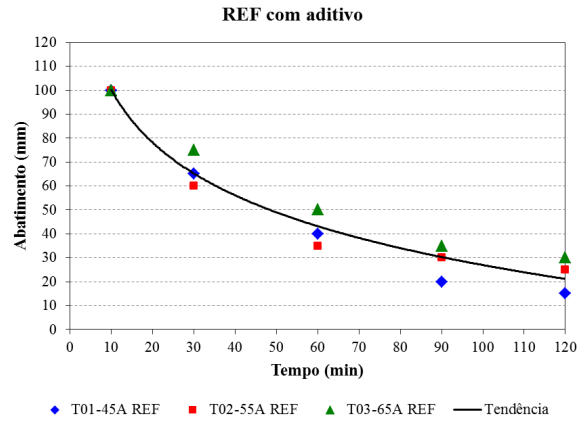
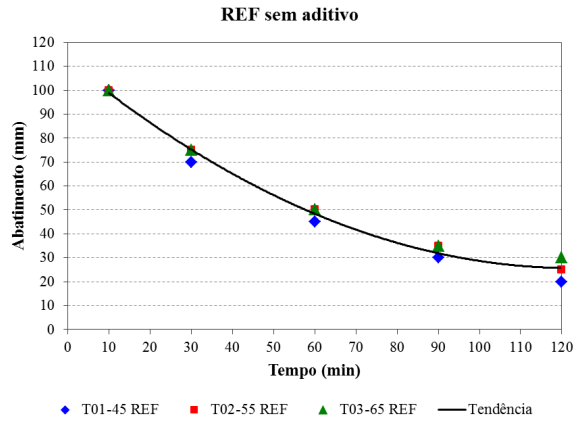
Tabela 21 – Abatimento ao longo do tempo – concretos com produzidos com AGRC com aditivo e seus concretos de referência, produzidos com AGN.

PM (%)	Tempo (min)	Abatimento (mm)		
		T01-45A REF	T02-55A REF	T03-65A REF
0	10	100	100	100
	30	65	60	75
	60	40	35	50
	90	20	30	35
	120	15	25	30
		T40-45A	T40-55A	T40-65A
40	10	90	95	110
	30	50	50	70
	60	30	30	35
	90	20	20	20
	120	15	10	15
		T60-45A	T60-55A	T60-65A
60	10	100	90	105
	30	50	50	45
	60	30	30	25
	90	20	20	15
	120	15	10	10
		T80-45A	T80-55A	T80-65A
80	10	110	90	90
	30	70	65	60
	60	40	40	35
	90	30	30	20
	120	20	15	15

Onde: PM = teor de pré-molhagem.

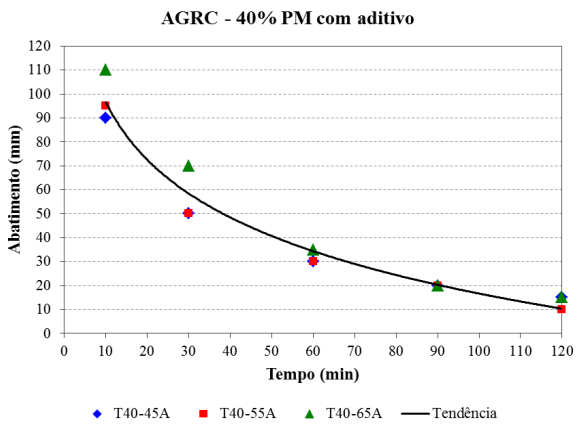
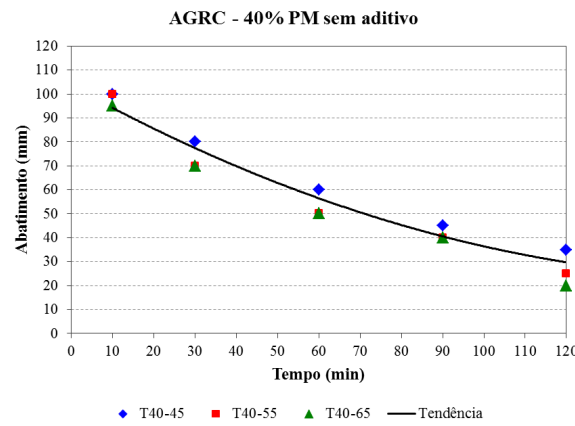
Comparando-se as perdas de abatimento dos concretos de referência ao longo do tempo, é possível constatar que nos concretos onde o aditivo foi utilizado, houve um pequeno acréscimo na queda do abatimento nos primeiros 30 minutos de ensaio, o qual foi sendo atenuado gradativamente. Entretanto, uma diferença de abatimento, na ordem de 10 mm, é considerada pouco relevante e se encontra dentro limite tolerado para o ensaio, podendo, portanto, ser desconsiderada para efeito prático.

A Figura 25 apresenta os gráficos com os resultados em relação à perda do abatimento para os concretos produzidos com AGRC com e sem a incorporação de aditivo superplastificante, com diferentes níveis de pré-molhagem, e seus concretos de referência, produzidos com AGN com e sem a utilização de aditivo.



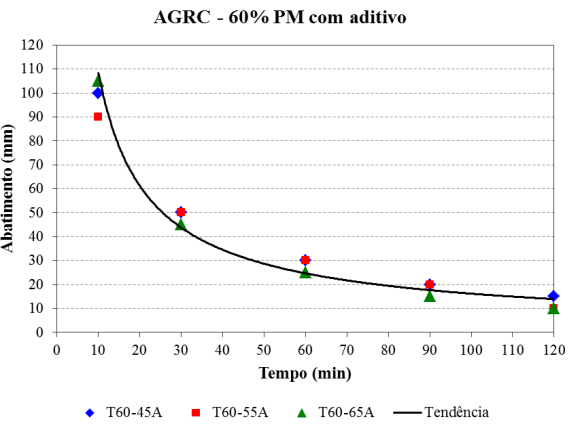
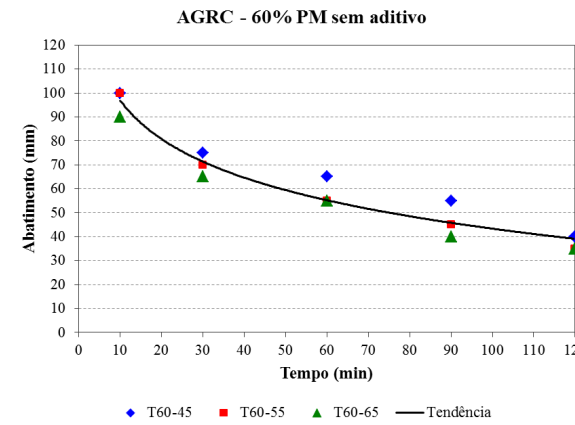
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

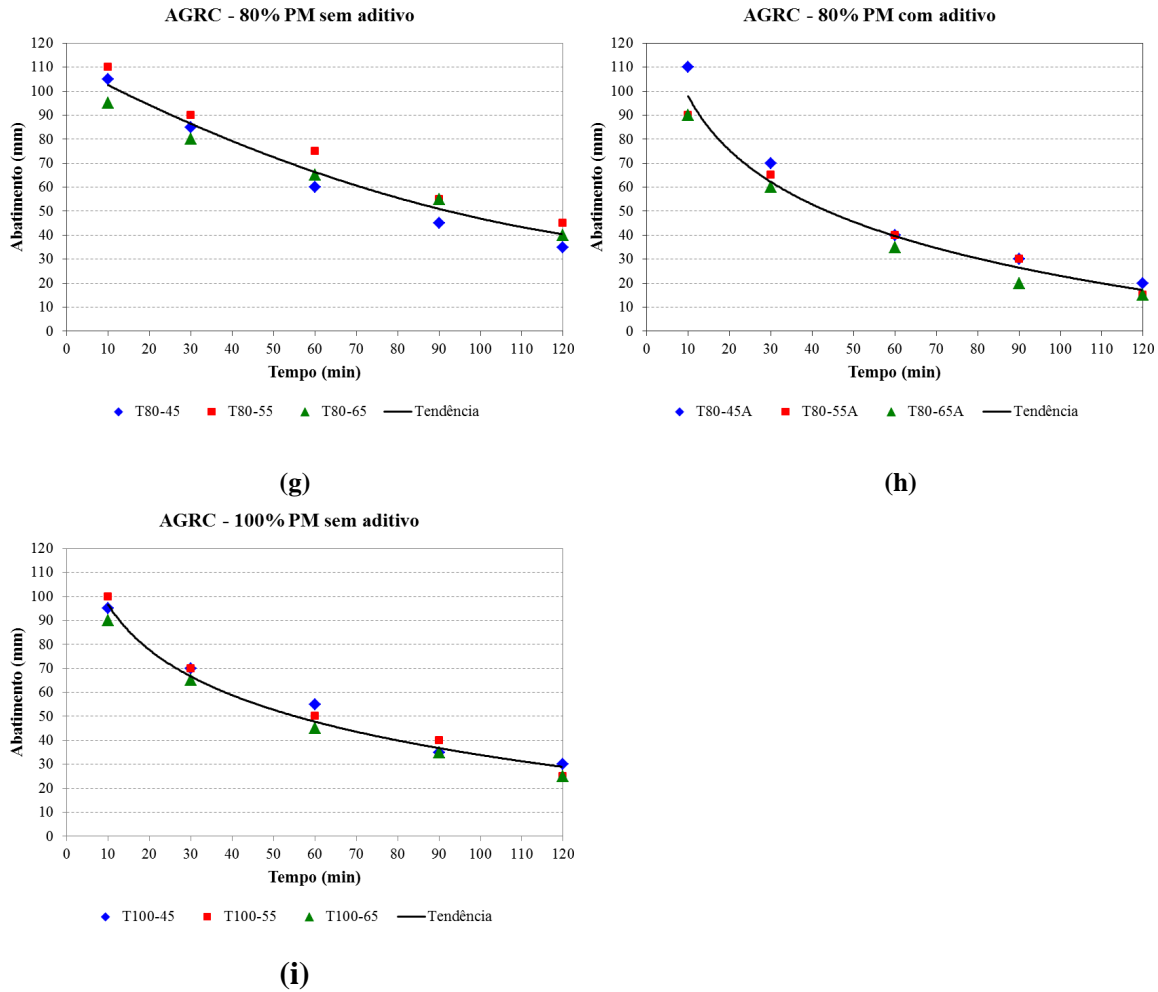


Figura 25 – Abatimento ao longo do tempo – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo e seus concretos de referência.

É possível observar que, para os concretos produzidos com aditivo, apesar dos abatimentos iniciais serem iguais, ao longo do tempo, ocorreram variações em relação aos resultados de abatimento, na ordem de até 20 mm, aparentemente decorrentes das variações do teor de água. Atribui-se estas variações ao término do efeito de ação plastificante do aditivo. Segundo dados do fabricante, o aditivo exerce sua ação durante um período de 30 a 40 minutos, e após este período, este perde gradativamente o seu efeito. É importante ressaltar que o comportamento apresentado pelos concretos analisados pode ser alterado através do emprego de outro tipo de aditivo ou em outras condições de temperatura e umidade relativa do ar.

Análise estatística:

Concretos produzidos com AGRC sem aditivo:

A análise de variância para as variáveis independentes (fatores) analisadas para os concretos produzidos com AGRC sem aditivo é apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 – ANOVA para a perda de abatimento – concretos com AGRC sem aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste <i>F</i>	Valor <i>p</i>	Significância
AC _i	132,292	2	66,1458	6,39	0,0080	S
PM	351,563	3	117,188	11,31	0,0002	S
T	11339,1	3	3779,69	364,88	0,0000	S
AC _i *PM	596,875	6	99,4792	9,60	0,0001	S
AC _i *T	34,375	6	5,72917	0,55	0,7615	NS
PM*T	171,354	9	19,0394	1,84	0,1299	NS
Resíduos	186,458	18	10,3588			
Total (corrigido)	12812,0	47				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; T = tempo; SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada; S = significativa; NS = não significativa.

Através da análise de variância apresentada na Tabela 22, onde os valores de *p* testam a significância estatística de cada um dos fatores e também das interações significativas entre eles, é possível observar que os três fatores e uma interação apresentam valores de *p* inferiores a 0,05, o que permite afirmar que estes fatores e a interação AC_i*PM apresentam um efeito estatisticamente significativo sobre o abatimento do concreto, com um nível de confiança de 95%.

Ao analisar as interações entre AC_i*T e PM*T, observa-se que estas apresentam valores de *p* maiores do que o nível de significância (0,05), concluindo assim que estas interações não são estatisticamente significativas em relação ao abatimento do concreto com AGRC produzido sem aditivo.

Embora a perda de abatimento dos concretos seja significativa para os fatores analisados sob o ponto de vista estatístico, esta é inferior a 10 mm, valor que de acordo com a norma ABNT NBR NM 67:1998 está classificado dentro do limite tolerado para o ensaio.

Os gráficos que apresentam as médias do efeito isolado dos fatores analisados em relação à perda de abatimento são apresentados na Figura 26, Figura 27 e Figura 28. A Figura 26 apresenta as médias do fator isolado AC_i sobre a perda de abatimento dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

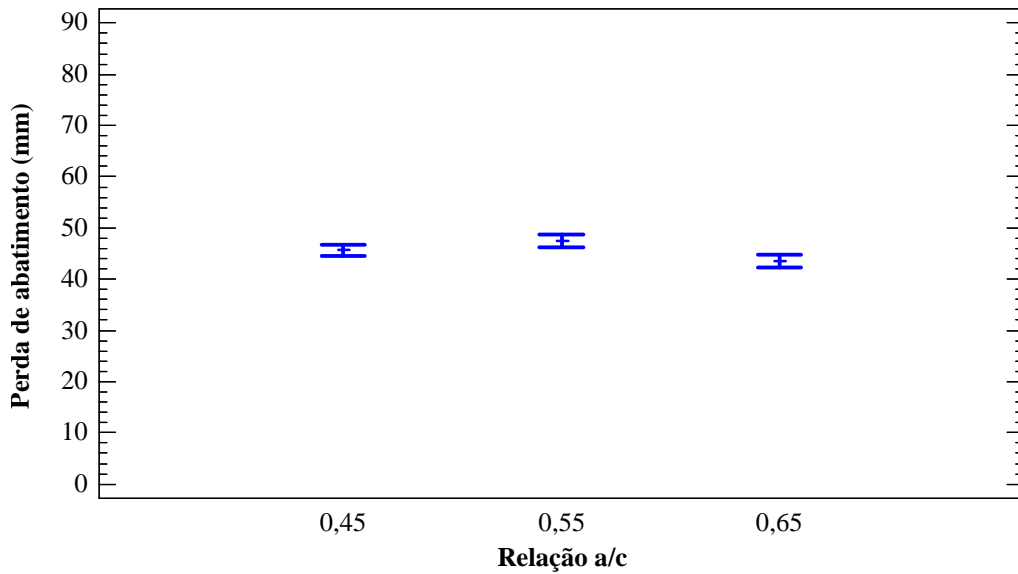


Figura 26 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC sem aditivo.

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 26, a relação água/cimento inicial exerce uma influência pequena sobre o abatimento dos concretos produzidos com AGRC sem a utilização de aditivo, na ordem de 5 mm, o que não é relevante.

O gráfico da Figura 27 apresenta as médias do efeito isolado dos níveis de pré-molhagem estabelecidos aos concretos para a perda de abatimento dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

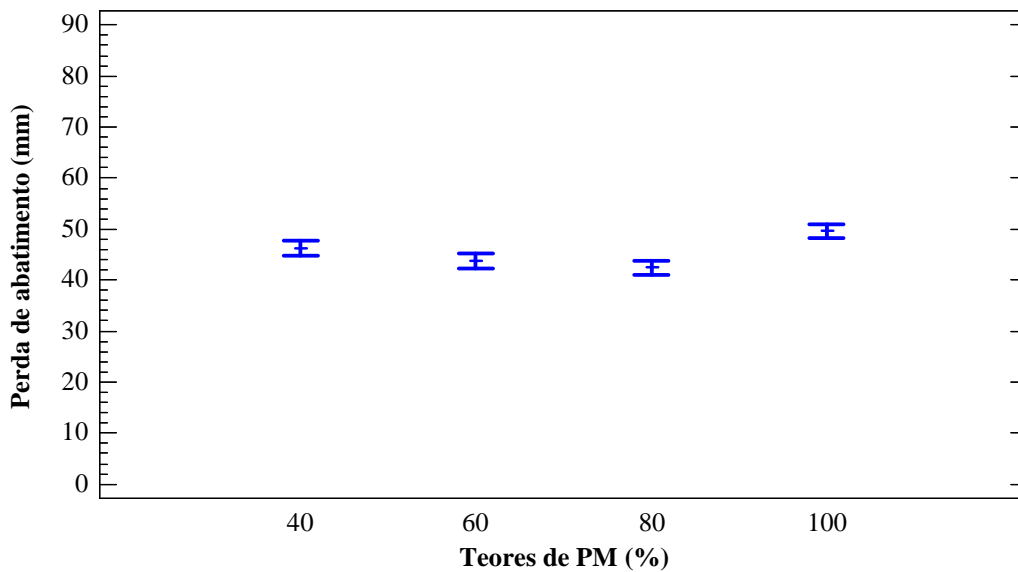


Figura 27 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC sem aditivo.

Através do gráfico apresentado na Figura 27, verifica-se que as maiores perdas de abatimento ao longo do tempo ocorreram para os níveis de pré-molhagem de 40 e 100% dos agregados reciclados.

Na Figura 28 é possível visualizar as médias para o efeito isolado tempo, em relação à perda de abatimento dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

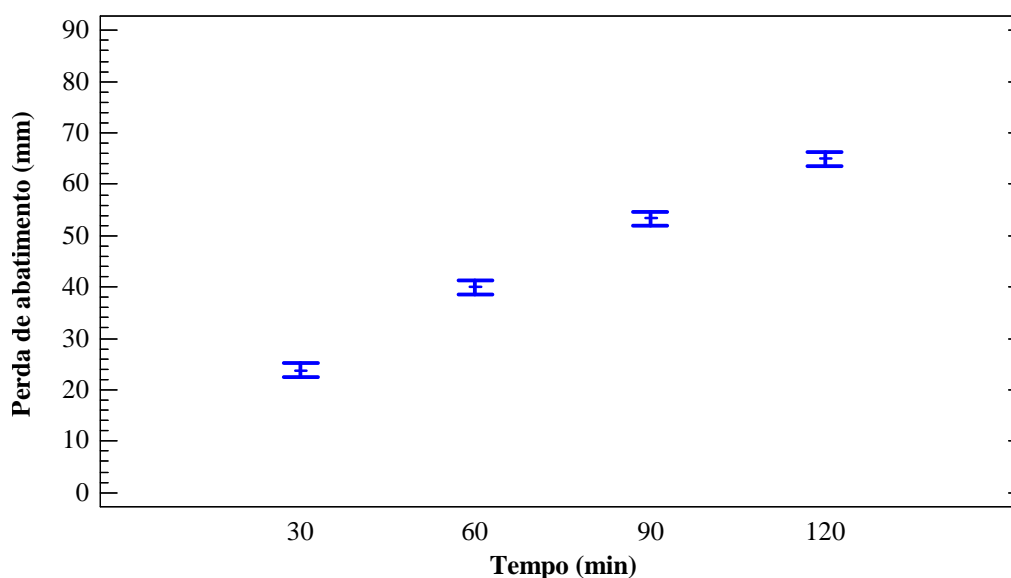


Figura 28 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator T sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC sem aditivo.

É possível comprovar através do gráfico apresentado pela Figura 28, assim como através dos resultados dos ensaios realizados, que a maior perda de abatimento ao longo do tempo (na ordem de 25 mm) ocorre até os primeiros 30 minutos de ensaio.

Observa-se, através dos gráficos apresentados nas Figura 26, Figura 27 e Figura 28, que embora todas as variáveis (relação água/cimento inicial, teor de pré-molhagem e tempo) sejam significativas, a única variável expressiva sob o ponto de vista tecnológico é o tempo (Figura 25).

Concretos produzidos com AGRC com aditivo:

A análise de variância para os concretos produzidos com AGRC com aditivo é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – ANOVA para a perda de abatimento – concretos com AGRC com aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste <i>F</i>	Valor <i>p</i>	Significância
AC _i	668,056	2	334,028	29,75	0,0000	S
PM	851,389	2	425,694	37,92	0,0000	S
T	9374,31	3	3124,77	278,33	0,0000	S
AC _i *PM	1065,28	4	266,319	23,72	0,0000	S
AC _i *T	81,9444	6	13,6574	1,22	0,3625	NS
PM*T	115,278	6	19,213	1,71	0,2016	NS
Resíduos	134,722	12	11,2269			
Total (corrigido)	12291,0	35				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; T = tempo; GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; S = significante; NS = não significante.

A análise de variância apresentada na Tabela 23 permite afirmar estatisticamente a significância dos três fatores apresentados e da interação AC_i*PM, com um nível de confiança de 95%. Ao analisar as interações entre AC_i*T e PM*T, é possível concluir que estas não são estatisticamente significativas em relação ao abatimento dos concretos com AGRC produzidos com aditivo.

Os gráficos de médias dos efeitos isolados sobre a perda de abatimento, que complementam a análise de variância realizada são apresentados nas Figura 29, Figura 30 e Figura 31. A Figura 29 apresenta a média do fator isolado AC_i para a perda de abatimento dos concretos produzidos com AGRC com aditivo.

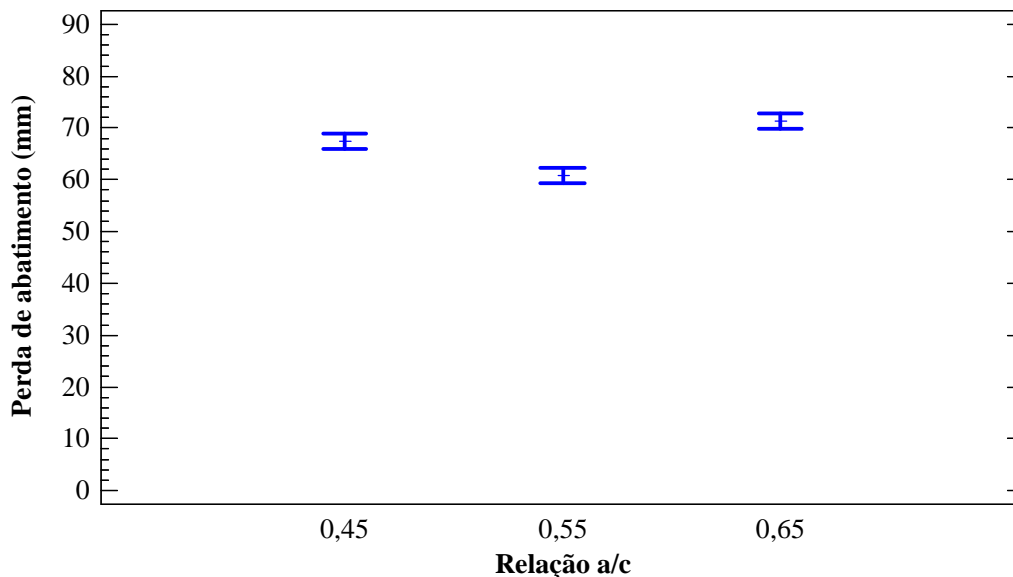


Figura 29 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com aditivo.

Ao analisar o gráfico da Figura 29 e de acordo com a Tabela 23, a relação água/cimento é classificada como estatisticamente significativa para estes concretos, embora

esta exerça uma influência pequena sobre o abatimento dos concretos produzidos com AGRC com aditivo.

A Figura 30 apresenta as médias do efeito para o fator isolado PM em relação à perda de abatimento dos concretos produzidos com AGRC com aditivo.

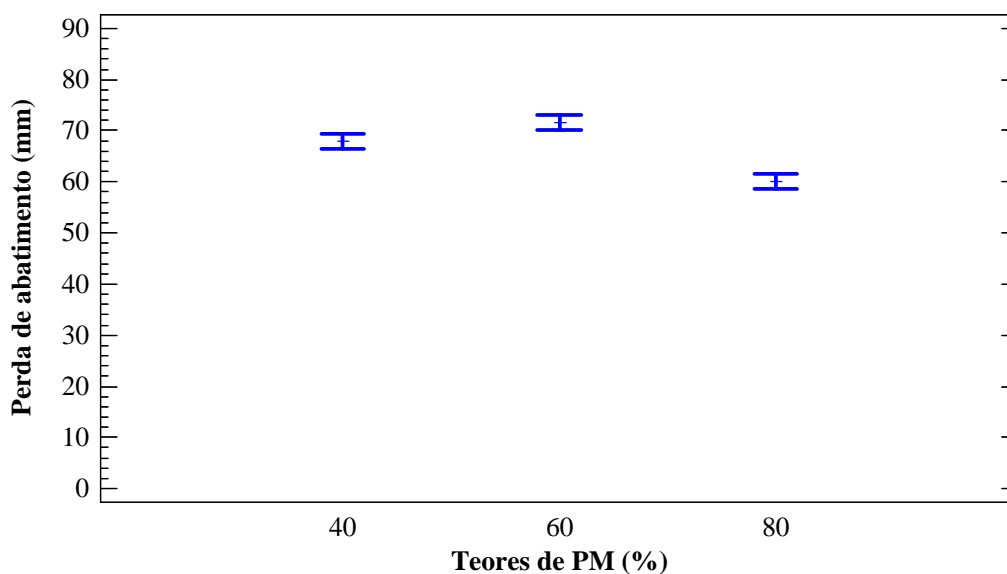


Figura 30 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com aditivo.

Conforme apresentado na Tabela 23 e ao analisar gráfico apresentado na Figura 30, os níveis de pré-molhagem são considerados estatisticamente significativos, porém com uma diferença muito pequena em relação aos níveis de 40 e 60% de pré-molhagem (inferior a 10 mm). O nível de 80% de pré-molhagem apresenta uma perda de abatimento menor (Figura 30) que o distingue dos demais. O comportamento apresentado indica que o maior teor de água presente no agregado (maior teor de pré-molhagem) contribui para que a perda de abatimento seja atenuada.

O gráfico da Figura 31 apresenta as médias do efeito da variável tempo, para a perda de abatimento dos concretos produzidos com AGRC com aditivo.

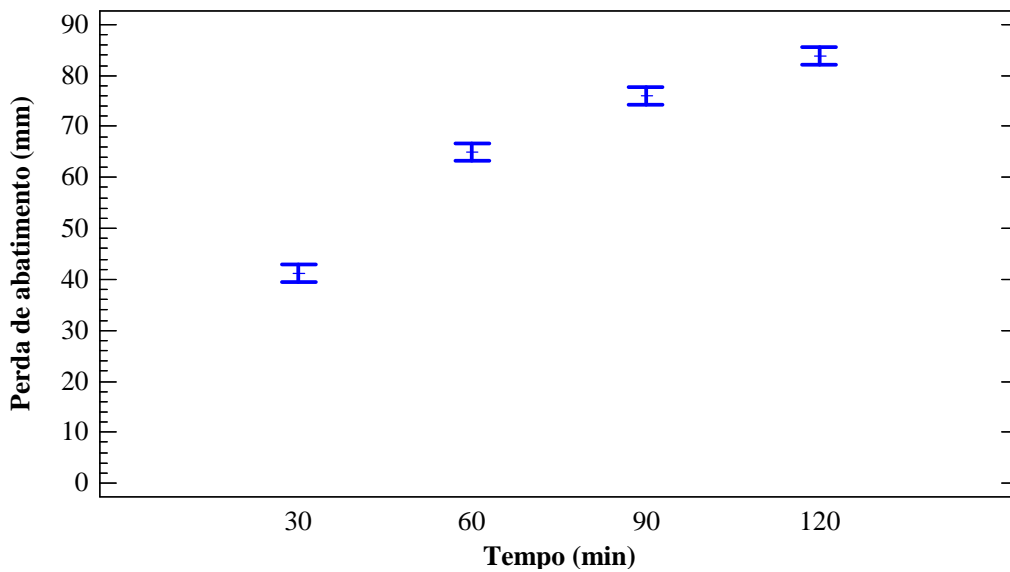


Figura 31 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator T sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com aditivo.

Através da Figura 31 observa-se que a queda do abatimento dos concretos com aditivo é mais expressiva nos primeiros 60 minutos, conforme previsto e observado através dos resultados obtidos nos ensaios.

Concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo:

A análise de variância para as variáveis independentes (fatores) analisadas para todos os concretos produzidos com AGRC (com aditivo e sem aditivo) são apresentados na Tabela 24. É importante destacar que a comparação entre os concretos com AGRC sem aditivo e os concretos com AGRC com aditivo, só é possível para os níveis de pré-molhagem de 40, 60 e 80%, devido ao fato de que não foi possível reproduzir o nível de 100% de pré-molhagem para os concretos com AGRC produzidos com aditivo.

Tabela 24 – ANOVA para a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste <i>F</i>	Valor <i>p</i>	Significância
AC _i	179,861	2	89,9306	12,95	0,0010	S
PM	609,028	2	304,514	43,85	0,0000	S
T	17603,8	3	5867,94	844,98	0,0000	S
AD	9000,35	1	9000,35	1296,05	0,0000	S
AC _i *PM	1155,56	4	288,889	41,60	0,0000	S
AC _i *T	36,8056	6	6,13426	0,88	0,5356	NS
AC _i *D	567,361	2	283,681	40,85	0,0000	S
PM*T	249,306	6	41,5509	5,98	0,0043	S
PM*AD	329,861	2	164,931	23,75	0,0001	S
T*AD	201,042	3	67,0139	9,65	0,0016	S
AC _i *PM*T	194,444	12	16,2037	2,33	0,0782	NS
AC _i *PM*AD	455,556	4	113,889	16,40	0,0001	S
AC _i *T*AD	77,0833	6	12,8472	1,85	0,1716	NS
PM*T*AD	22,9167	6	3,81944	0,55	0,7614	NS
Resíduos	83,3333	12	6,94444			
Total (corrigido)	30766,3	71				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; T = tempo; AD = aditivo; GL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; S = significante; NS = não significante.

A análise de variância apresentada na Tabela 24 permite afirmar que as variáveis independentes apresentam-se estatisticamente significativas, a um nível de confiança de 95%, sendo o valor de *p* menor que 0,05. Ao analisar cada interação entre as variáveis apresentadas, é possível afirmar que seis interações são estatisticamente significativas (valor de *p* menor que 0,05) enquanto quatro interações não apresentam significância (valor de *p* maior que 0,05) a um mesmo nível de confiança, conforme pode ser visualizado na tabela.

A ANOVA indica que o fator mais significativo ao se comparar a diferença de resultados de abatimento entre os concretos com e sem aditivo é o próprio uso de aditivo, que segundo o Teste *F* supera a influência do fator tempo. Comparando os concretos produzidos com AGRC com aditivo com os concretos produzidos com AGRC sem o uso do mesmo, em relação aos valores de *H* totais obtidos, (Tabela 18 e Tabela 20) é possível observar um menor valor de *H* total para os concretos produzidos com AGRC com aditivo, o que justifica um abatimento menor para estes concretos. Ao realizar uma comparação entre os concretos produzidos com AGRC com aditivo e os concretos com AGRC sem o uso deste, em relação aos resultados apresentados para o ensaio de abatimento, percebe-se que os concretos com AGRC com aditivo apresentam uma maior perda de abatimento ao final do ensaio em relação aos concretos produzidos com AGRC sem aditivo. A maior perda de abatimento foi verificada nos traços com níveis de pré-molhagem de 40 e 60%.

Os gráficos que apresentam as médias dos efeitos isolados sobre a perda de abatimento para os concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo, são apresentados nas Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35. O gráfico da Figura 32 apresenta as médias do efeito isolado do fator AC_1 sobre a perda de abatimento dos concretos produzidos com AGRC com e sem a utilização de aditivo.

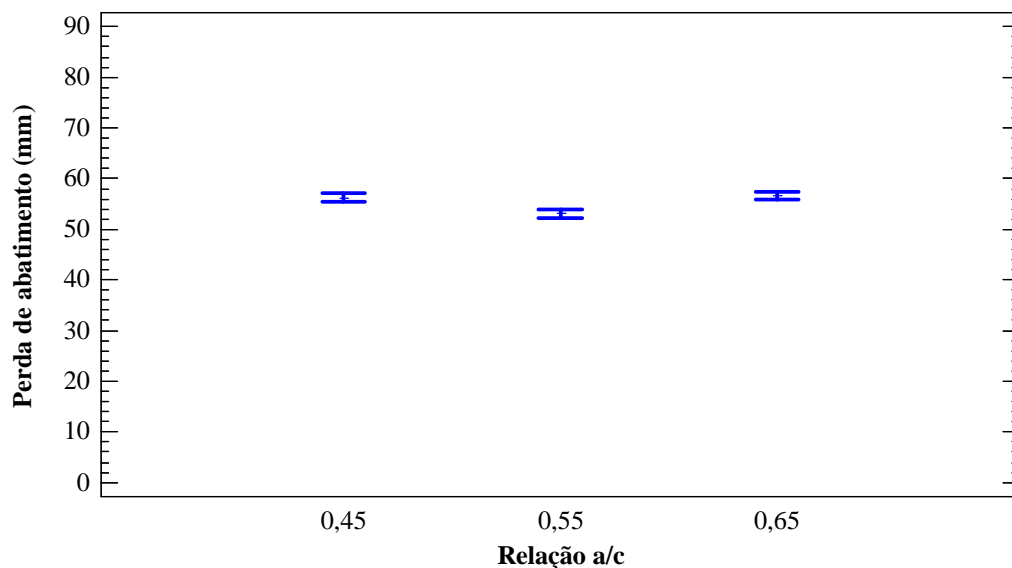


Figura 32 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_1 sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.

Conforme apresentado pela Figura 32, a relação água/cimento inicial exerce uma influência pequena sobre o abatimento dos concretos com AGRC produzidos com e sem a utilização de aditivo.

A Figura 33 apresenta o gráfico com as médias do efeito do fator isolado PM sobre a perda de abatimento dos concretos produzidos com AGRC com e sem a utilização de aditivo.

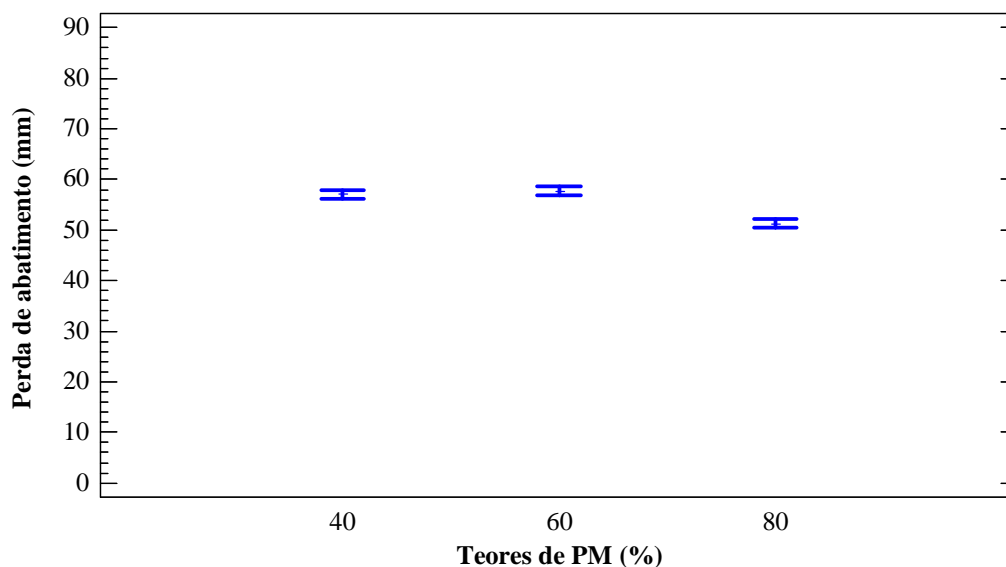


Figura 33 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.

Levando em consideração que a comparação entre os concretos com AGRC sem aditivo e os concretos com AGRC com aditivo é realizada apenas para os níveis de pré-molhagem de 40, 60 e 80%, através da análise estatística, é possível identificar dois grupos distintos, o primeiro formado pelos teores de 40 e 60% de pré-molhagem, e o segundo, do teor de pré-molhagem de 80%, o qual apresenta uma menor diferença em relação à perda de abatimento. Entretanto, verifica-se que a diferença entre os grupos se apresenta na ordem de 10 mm, o que, sob o aspecto de utilização, é pouco relevante.

Na Figura 34 são apresentadas as médias do efeito isolado do fator tempo para a perda de abatimento dos concretos produzidos com AGRC com e sem o uso de aditivo.

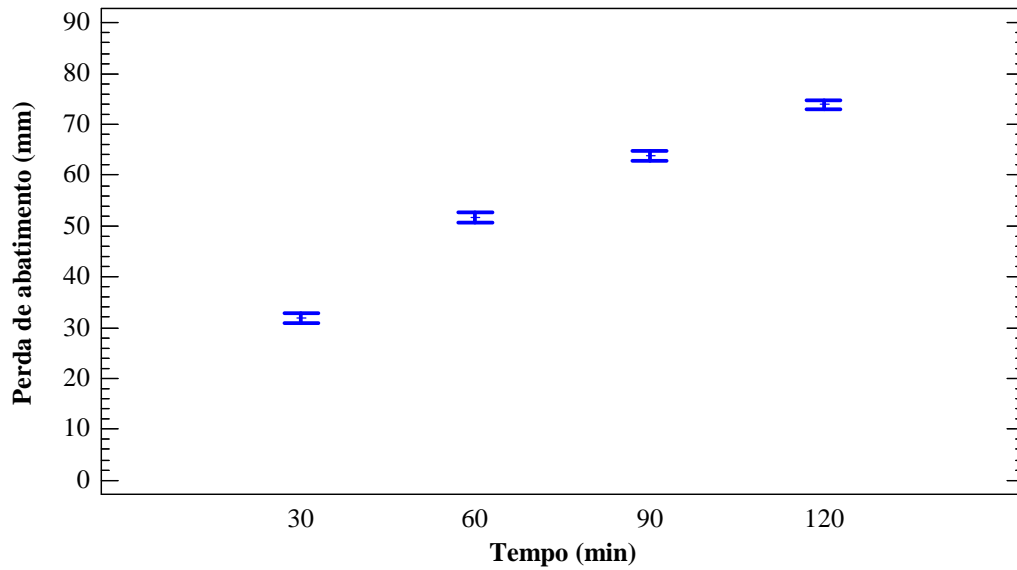


Figura 34 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator T sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.

A variável tempo (Figura 34) é muito expressiva tanto para os concretos produzidos com aditivo, quanto para os concretos onde não foi feito o uso do mesmo.

O gráfico da Figura 35 apresenta as médias do efeito isolado do fator aditivo em relação à perda de abatimento dos concretos produzidos com e sem aditivo.

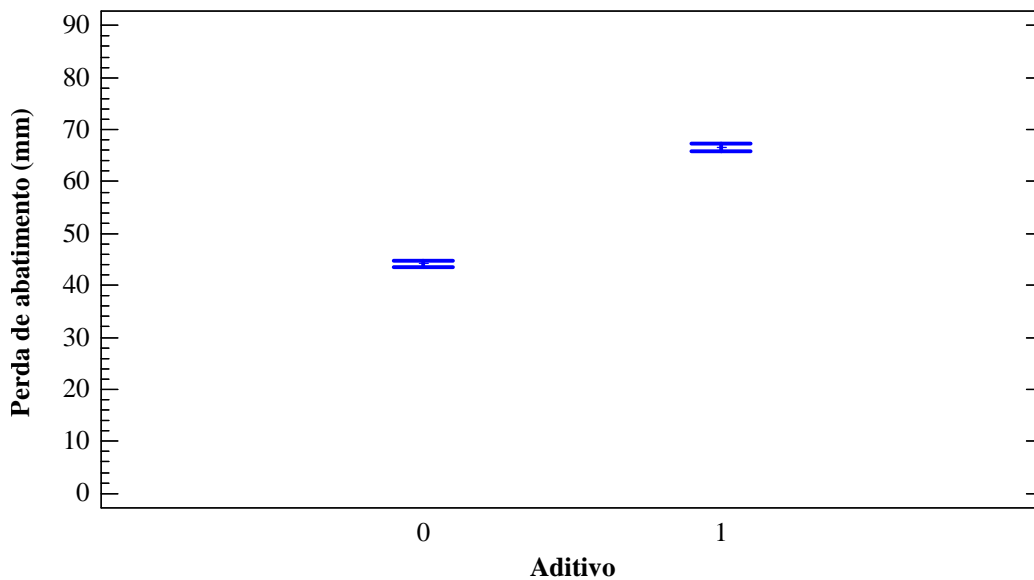


Figura 35 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AD sobre a perda de abatimento – concretos com AGRC com e sem aditivo.

Os concretos produzidos com AGRC sem aditivo possuem um valor de H total similar, independente do teor de pré-molhagem que cada um apresenta, e este valor está na

ordem de 10,5%. Nos concretos produzidos com AGRC com aditivo, verifica-se uma diferença no teor total de água entre os traços, onde o abatimento é corrigido através do uso de aditivo ao invés de água, e os valores apresentados são mais baixos quando comparados aos valores apresentados pelos concretos produzidos sem a utilização de aditivo, o que é confirmado através da significância do fator AD, visualizada na Tabela 24 e através do gráfico da Figura 35.

4.1.2 Resistência à compressão axial aos 28 dias

Para este ensaio, foram moldados 3 corpos de prova de cada concreto produzido, os quais foram ensaiados na idade de 28 dias. Os valores obtidos individualmente para cada amostra ensaiada são apresentados no Apêndice B. A análise de variância realizada a partir dos resultados obtidos é apresentada na sequência.

Concretos de referência:

Na Figura 36 são apresentados os maiores valores dentre os resultados obtidos durante ensaios de resistência à compressão axial para cada concreto de referência produzido com AGN com e sem aditivo.

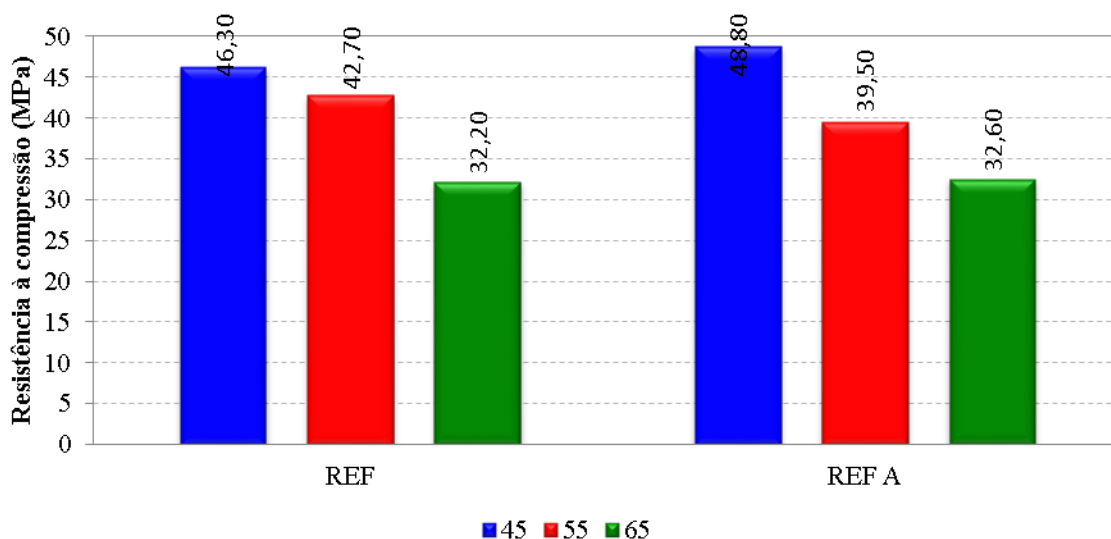


Figura 36 – Resistência à compressão – concretos de referência produzidos com AGN com e sem aditivo.

Nos concretos onde se utilizou aditivo superplastificante é possível observar que estes apresentaram um pequeno ganho na resistência, decorrente da redução no teor de água da mistura, conforme o esperado.

Concretos produzidos com AGRC sem aditivo:

Na Figura 37 é apresentado o gráfico com as médias calculadas a partir dos resultados obtidos durante ensaios de resistência à compressão axial para os concretos produzidos com AGRC, sem a utilização de aditivo.

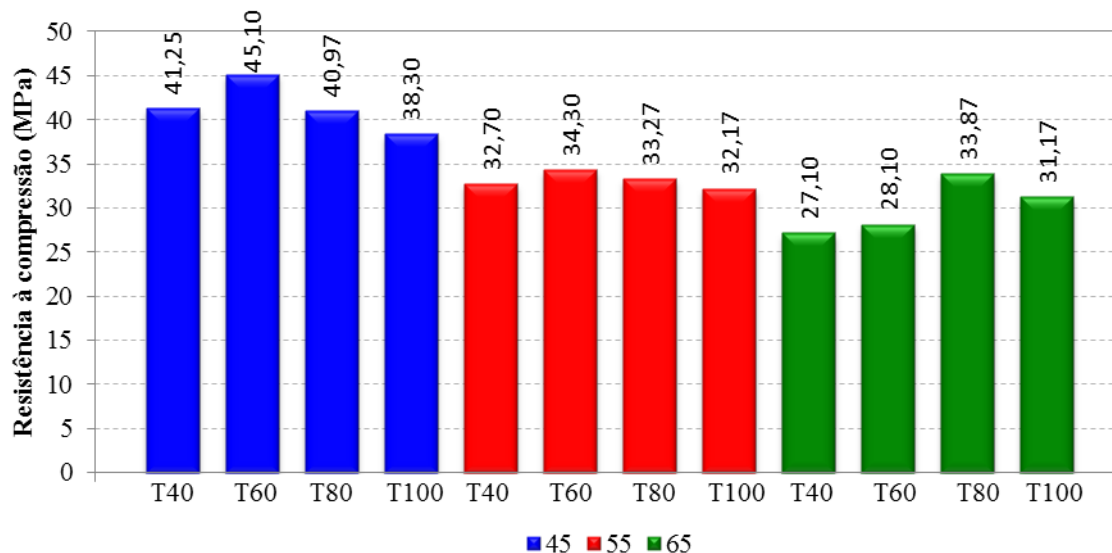


Figura 37 – Resistência à compressão – concretos com AGRC sem aditivo.

Em relação ao comportamento da resistência à compressão apresentado pelos concretos com AGRC produzidos sem aditivo, é possível inferir que, para um mesmo nível de pré-molhagem, todos os concretos que possuem uma relação água/cimento inicial mais baixa apresentam uma maior resistência, conforme o esperado. Porém, a análise estatística demonstra que não há um determinado teor de pré-molhagem que resulte em maior resistência. Pode-se observar, entretanto, que há um pequeno aumento de resistência nos teores de pré-molhagem entre 60 e 80%, que pode ser observado na Figura 39.

A análise de variância para as variáveis independentes (fatores) analisadas para os concretos produzidos com AGRC sem aditivo é apresentada na Tabela 25.

Tabela 25 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos com AGRC sem aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste <i>F</i>	Valor <i>p</i>	Significância
AC _i	739,385	2	369,693	21,94	0,0000	S
PM	39,0617	3	13,0206	0,77	0,5216	NS
AC _i *PM	109,087	6	18,1812	1,08	0,4049	NS
Resíduos	370,698	22	16,8499			
Total (corrigido)	1274,55	33				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada; S = significante; NS = não significante.

A análise de variância apresentada na Tabela 25 permite afirmar estatisticamente a significância do fator AC_i em relação à resistência dos concretos reciclados produzidos sem

aditivo, com um nível de confiança de 95%. O fator PM, assim como a interação deste fator com o fator AC_i , não são estatisticamente significativos, confirmando o que pode ser avaliado através dos resultados do ensaio de compressão axial apresentado (Figura 37).

Os gráficos de médias que complementam a análise de variância são apresentados na Figura 38 e Figura 39. A Figura 38 apresenta as médias do efeito isolado do fator água/cimento inicial sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

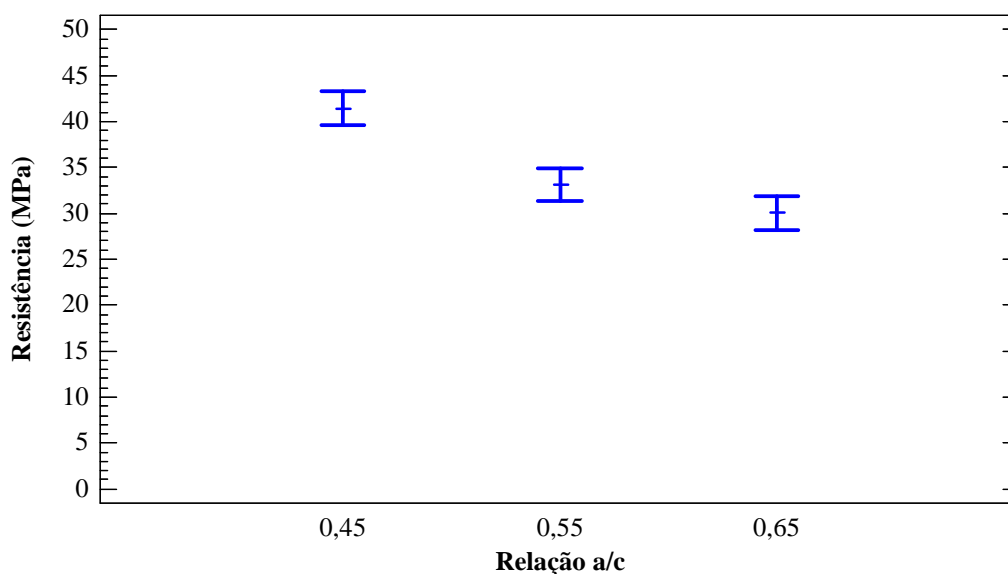


Figura 38 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

Conforme apresentado nos resultados de resistência à compressão dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo e comprovado através da análise estatística na Figura 38, a relação água/cimento inicial é estatisticamente significativa para os concretos produzidos. A diferença de médias entre a relação água/cimento inicial de 0,45 e de 0,55 é de 9 MPa, e entre a relação água/cimento inicial de 0,55 e 0,65 é de 3 MPa.

A Figura 39 apresenta o gráfico com as médias do efeito isolado do fator pré-molhagem sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

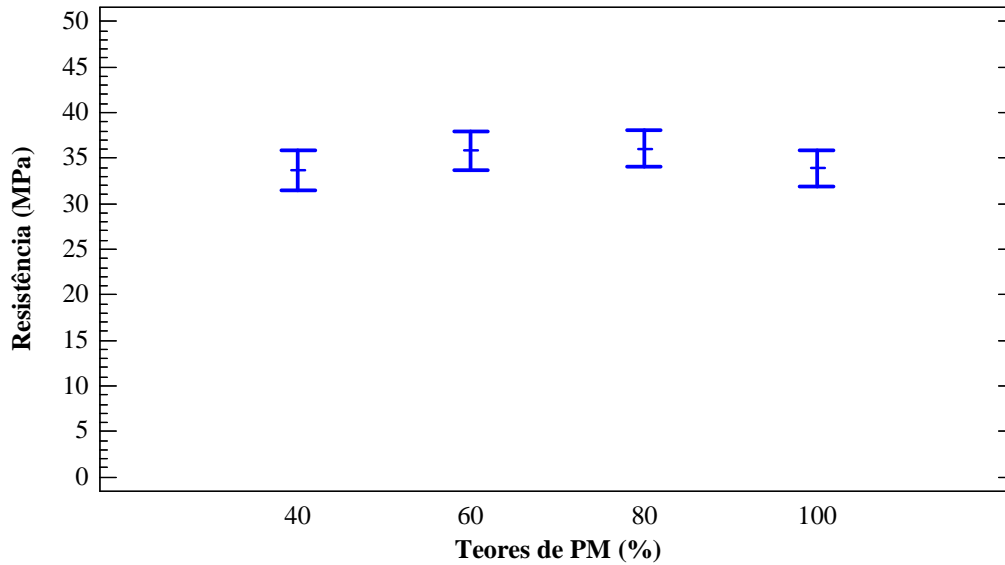


Figura 39 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

Conforme verificado na Tabela 25 e apresentado pela Figura 39, apesar do pequeno acréscimo de resistência visualizado nos teores de 60 e 80% de pré-molhagem, não é possível afirmar estatisticamente que há influência da pré-molhagem sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos sem a utilização de aditivo, o que confirma as análises apresentadas anteriormente em relação a estes concretos.

Concretos produzidos com AGRC com aditivo:

Na Figura 40 é apresentado o gráfico com as médias calculadas a partir dos resultados obtidos durante ensaios de resistência à compressão axial para os concretos produzidos com AGRC, através da utilização de aditivo.

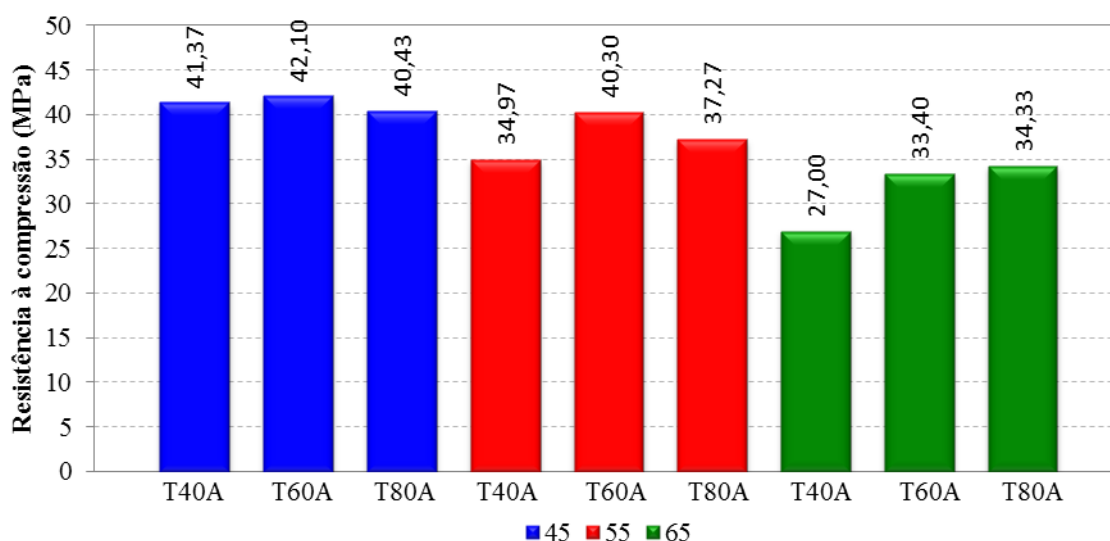


Figura 40 – Resistência mecânica – concretos com AGRC com aditivo.

Ao analisar o comportamento da resistência à compressão dos concretos produzidos com AGRC com aditivo, apresentados na Figura 40, pode-se inferir que estes apresentam uma maior resistência quando produzidos através de relações água/cimento iniciais mais baixas. Em relação ao teor de pré-molhagem das misturas, observa-se variações na resistência entre os diversos concretos, porém, na análise estatística realizada, o fator PM não se apresenta significativo em relação à resistência (vide Tabela 26).

A análise de variância para as variáveis independentes (fatores) analisadas, para os concretos produzidos com AGRC com aditivo, é apresentada na Tabela 26.

Tabela 26 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos com AGRC com aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste <i>F</i>	Valor <i>p</i>	Significância
AC _i	432,245	2	216,123	10,77	0,0008	S
PM	81,7652	2	40,8826	2,04	0,1594	NS
AC _i *PM	60,9659	4	15,2415	0,76	0,5650	NS
Resíduos	361,193	18	20,0663			
Total (corrigido)	936,17	26				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada; S = significante; NS = não significante.

Através da análise de variância apresentada na Tabela 26 é possível observar que o fator AC_i é a única variável que apresenta um efeito estatisticamente significativo sobre a resistência dos concretos produzidos, o que confirma o que foi verificado anteriormente através da Figura 40. Ao analisar o fator PM e a interação entre AC_i*PM, observa-se que estes não são estatisticamente significativos em relação à resistência destes concretos, o que também foi verificado na análise dos resultados obtidos no ensaio.

Os gráficos que apresentam as médias dos fatores isolados sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos estão apresentados na Figura 41 e Figura 42. A Figura 41 apresenta as médias do efeito isolado do fator água/cimento inicial para a resistência à compressão do concreto produzido com AGRC com aditivo.

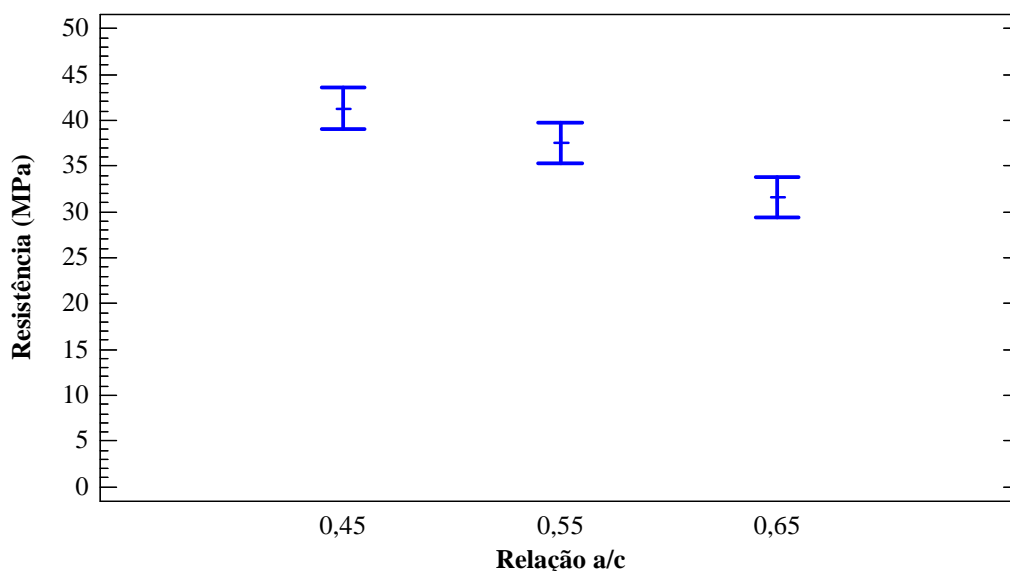


Figura 41 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com aditivo.

De acordo com os resultados do ensaio de compressão axial apresentados pelos concretos produzidos com AGRC com aditivo e conforme apresentado na Tabela 26 e comprovado através da Figura 41, a relação água/cimento inicial é estatisticamente significativa para a resistência dos concretos, e quanto menor a relação água/cimento inicial, maiores os valores de resistência dos concretos produzidos.

Nota-se que em função do modo como foi realizada a adição de água há duas possíveis relações a/c para cada traço produzido, a “relação a/c inicial” correspondente à água adicionada à argamassa, e a “relação a/c final”, que corresponde ao somatório entre a água que está na argamassa e a água que está no interior do AGRC em função da PM. Os resultados demonstram que existe uma relação entre a relação a/c inicial e a resistência à compressão, o que também é coerente com os valores das relações a/c finais atingidas.

A Figura 42 apresenta o gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a resistência à compressão do concreto produzido com AGRC com aditivo.

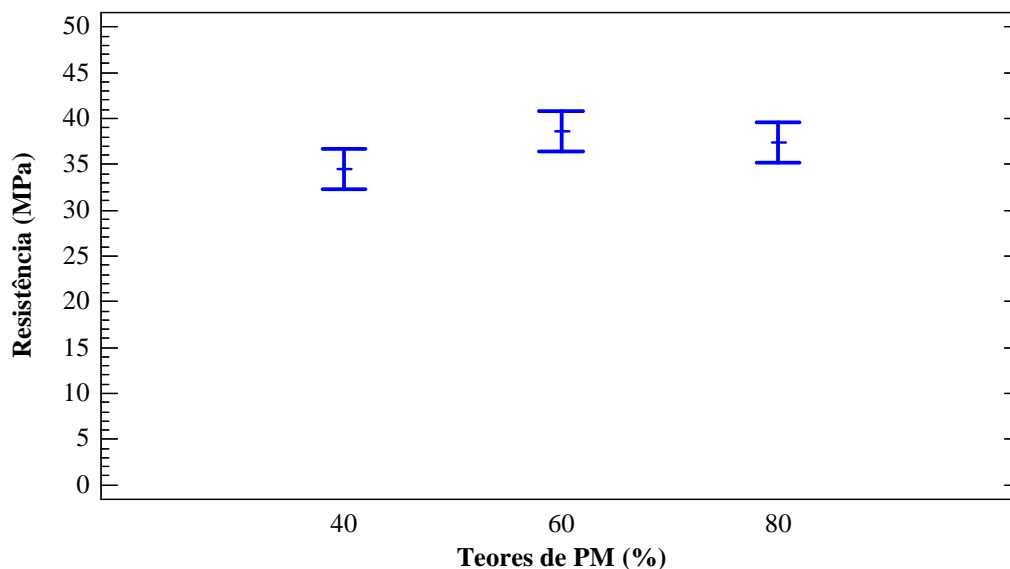


Figura 42 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com aditivo.

Conforme verificado na Tabela 26 e apresentado através da Figura 42, apesar das relações a/c finais sofrerem maior aumento nos maiores teores de pré-molhagem, estes não exercem influência significativa sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos com aditivo.

Concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo:

No gráfico apresentado na Figura 43 encontram-se as médias calculadas a partir dos resultados obtidos durante ensaios de resistência à compressão axial para todos os concretos produzidos com AGRC, através da utilização ou não de aditivo.

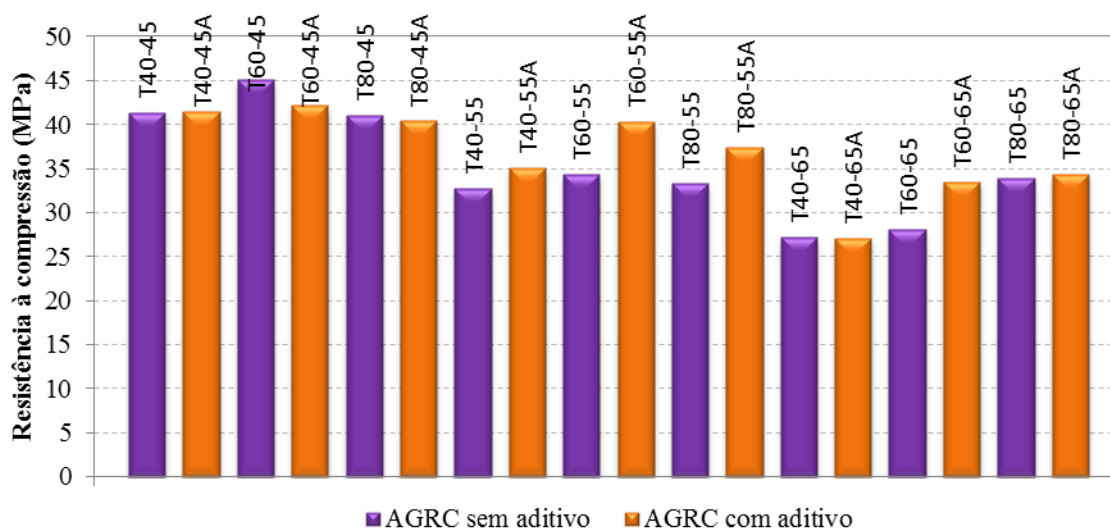


Figura 43 – Resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo.

Na Figura 43 é possível perceber que os resultados de resistência à compressão são mais altos para as relações água/cimento mais baixas em todos os concretos com AGRC produzidos. Não foi possível observar um aumento na resistência dos concretos com AGRC produzidos com aditivo superplastificante, em relação aos concretos com AGRC produzidos sem aditivo, possivelmente devido à porosidade do agregado reciclado superar o efeito da diminuição do teor de água nos concretos produzidos com aditivo.

A análise de variância para as variáveis independentes (fatores) analisadas para os concretos produzidos com AGRC são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos com AGRC com e sem aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste <i>F</i>	Valor <i>p</i>	Significância
AC _i	1056,04	2	528,019	30,36	0,0000	S
PM	95,4169	2	47,7085	2,74	0,0786	NS
AD	33,2737	1	33,2737	1,91	0,1756	NS
AC _i *PM	106,768	4	26,6921	1,53	0,2142	NS
AC _i *AD	59,3006	2	29,6503	1,70	0,1970	NS
PM*AD	8,95231	2	4,47616	0,26	0,7746	NS
AC _i *PM*AD	32,197	4	8,04924	0,46	0,7625	NS
Resíduos	591,378	34	17,3935			
Total (corrigido)	2000,81	51				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; T = tempo; AD = aditivo; SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada; S = significativa; NS = não significativa.

A análise de variância apresentada na Tabela 27 permite afirmar que o fator AC_i apresenta um efeito estatisticamente significativo sobre a resistência dos concretos produzidos. Ao analisar os fatores PM e AD, assim como todas as interações realizadas, observa-se que estes não são estatisticamente significativos em relação à resistência dos concretos reciclados produzidos com e sem aditivo.

Os gráficos que complementam a análise de variância são apresentados nas Figura 44, Figura 45 e Figura 46. O gráfico de médias do efeito isolado do fator água/cimento inicial em relação à resistência dos concretos produzidos com AGRC com e sem a utilização de aditivo é apresentado na Figura 44.

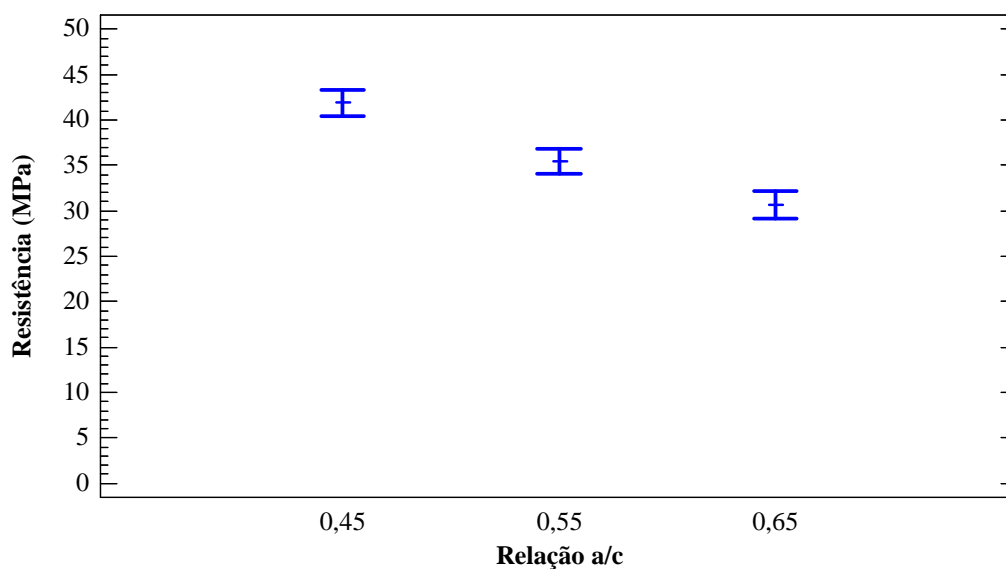


Figura 44 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator AC_i sobre a resistência à compressão - concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo.

De acordo com os resultados apresentados pelos concretos com AGRC durante o ensaio de compressão axial e comprovado através da análise estatística e da Figura 44, a relação água/cimento inicial é estatisticamente significativa para a resistência de todos os concretos, e quanto menor a relação água/cimento inicial, maiores os valores de resistência para os concretos produzidos, independente da utilização ou não de aditivo superplastificante às misturas.

A Figura 45 apresenta as médias do efeito isolado do fato pré-molhagem sobre a resistência à compressão dos concretos com AGRC produzidos com e sem aditivo.

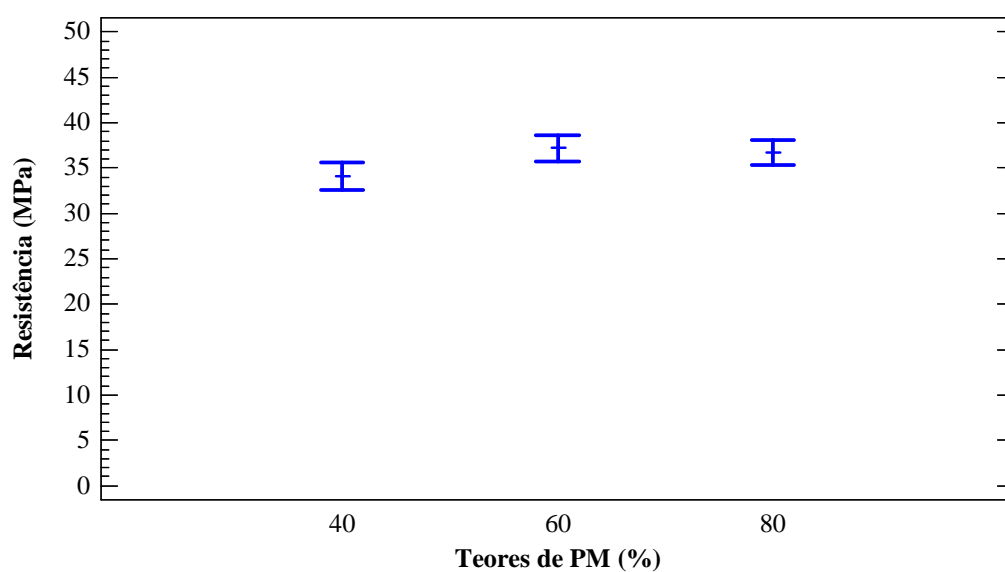


Figura 45 – Gráfico de médias do efeito isolado do fator PM sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo.

Conforme verificado na análise estatística realizada e apresentado na Figura 45, os teores de pré-molhagem não exercem influência sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos com ou sem a utilização de aditivo.

Na Figura 46 é possível visualizar o gráfico com as médias do efeito isolado aditivo sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo.

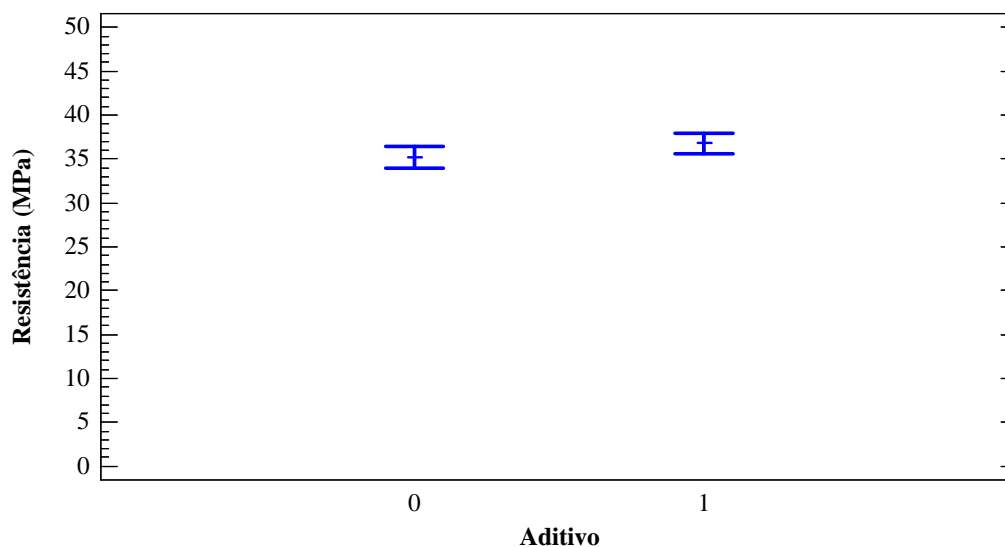


Figura 46 – Gráficos de médias do efeito isolado AD sobre a resistência à compressão – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo.

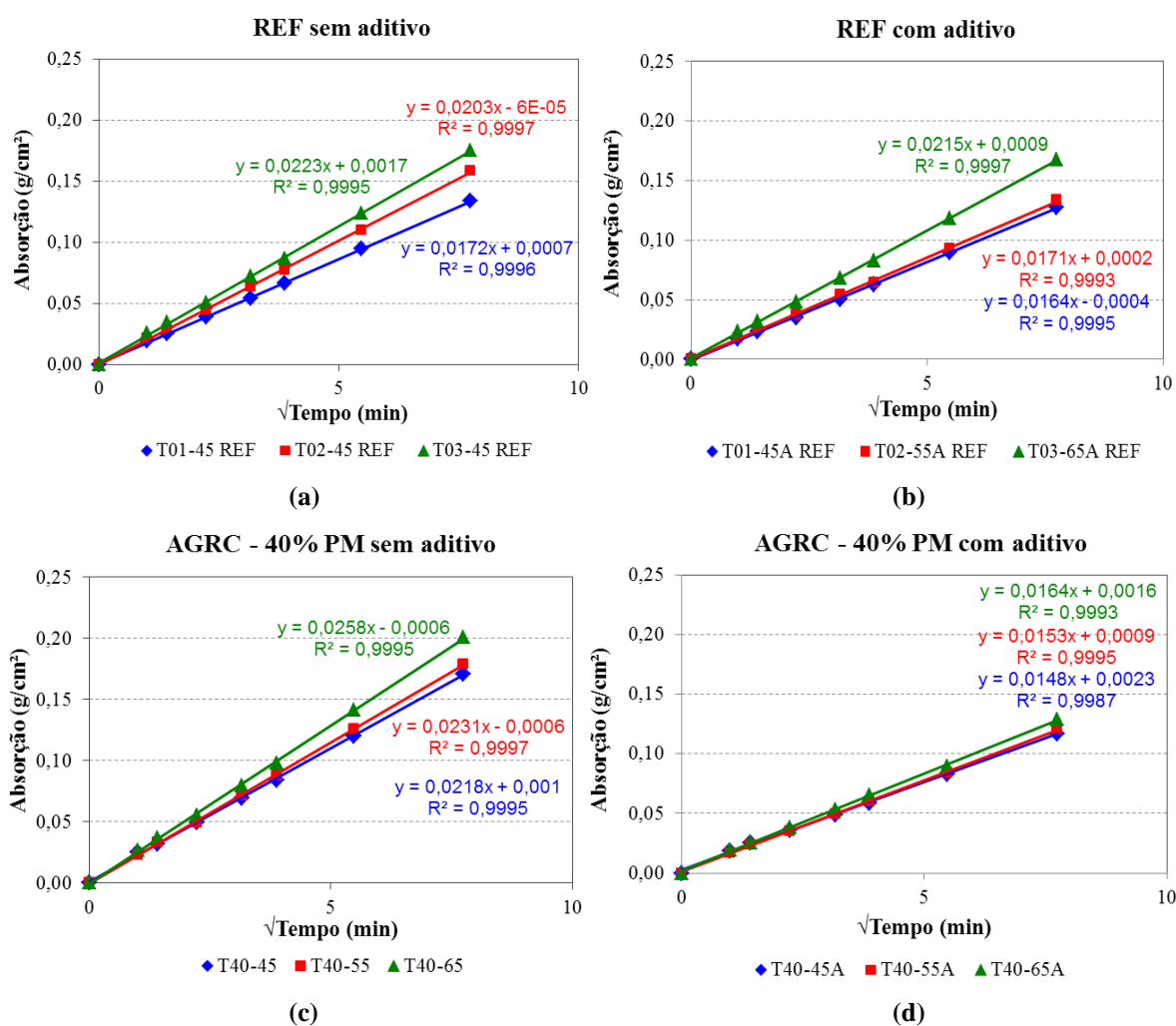
De acordo com os dados apresentados para o ensaio de resistência à compressão de todos os concretos com AGRC produzidos, e conforme pode ser visualizado na Figura 46, a utilização ou não de aditivo superplastificante na produção destes concretos não se apresenta estatisticamente significativa sobre a resistência à compressão dos mesmos. A utilização de aditivo não contribuiu significativamente para uma elevação da resistência dos concretos com AGRC produzidos.

4.1.3 Absorção de água por capilaridade

Os resultados dos ensaios de durabilidade da propriedade de absorção de água por capilaridade são apresentados neste tópico. As amostras ensaiadas foram obtidas para os concretos de referência, produzidos com AGN e demais concretos, produzidos com AGRC, com e ou sem a utilização de aditivo, na idade de 28 dias. O período total de tempo estipulado para o ensaio foi de 60 minutos e os resultados estão expressos em percentual de massa de água absorvida pela área de contato (g/cm^2) da amostra. Na Figura 47, são apresentados os

gráficos do ensaio de absorção de água por capilaridade, ao longo dos tempos estipulados, para os concretos com AGRC produzidos com e sem a utilização de aditivo, e seus concretos de referência, produzidos com AGN, juntamente com os coeficientes de determinação (R^2) alcançados pelas retas obtidas através de Regressão Linear realizada para os dados obtidos nos ensaios.

Os resultados obtidos individualmente para cada amostra ensaiada constam no Apêndice C. Os dados obtidos foram tratados estatisticamente e os resultados são apresentados na sequência.



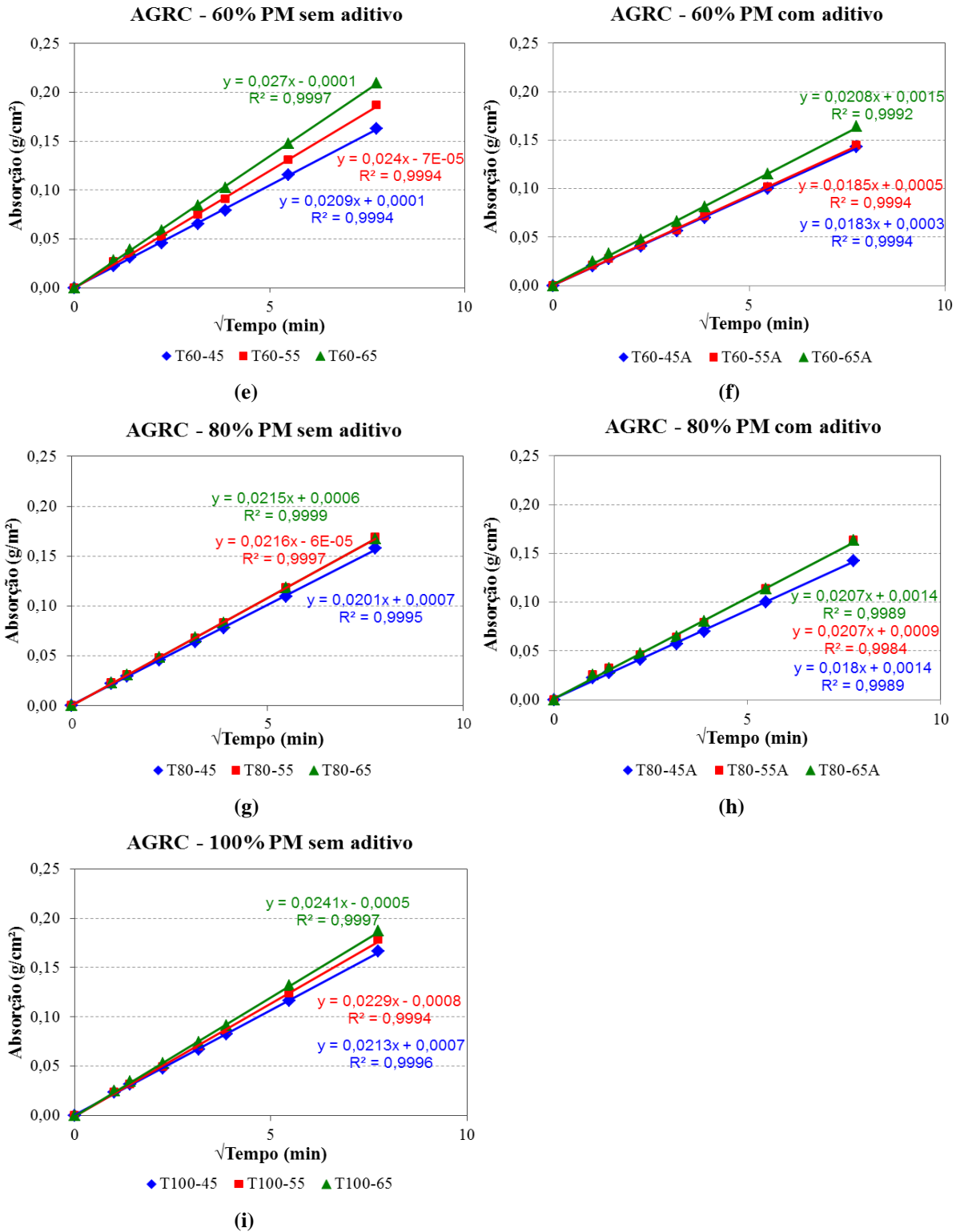


Figura 47 – Absorção de água por capilaridade – concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo e seus concretos de referência.

A Tabela 28 apresenta os valores de todos os coeficientes de capilaridade obtidos durante os ensaios realizados para os concretos com AGRC sem aditivo e seus concretos de referência.

Tabela 28 – Coeficientes de capilaridade obtidos para as amostras dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo e seus concretos de referência.

PM (%)	Coeficiente de capilaridade (n)		
	0,45	0,55	0,65
0	0,017	0,020	0,022
40	0,022	0,023	0,026
60	0,021	0,024	0,027
80	0,020	0,022	0,022
100	0,021	0,023	0,024

A Tabela 29 apresenta os valores de todos os coeficientes de capilaridade obtidos durante os ensaios realizados para os concretos com AGRC com aditivo e seus concretos de referência.

Tabela 29 – Coeficientes de capilaridade obtidos para as amostras dos concretos produzidos com AGRC com aditivo e seus concretos de referência.

PM (%)	Coeficiente de capilaridade (n)		
	0,45	0,55	0,65
0	0,016	0,017	0,022
40	0,015	0,015	0,016
60	0,018	0,019	0,021
80	0,018	0,021	0,021

Através dos resultados apresentados pelos gráficos da Figura 47 e dos valores dos coeficientes de capilaridade, obtidos para os concretos produzidos com AGRC e seus concretos de referência, com AGN, com e sem a utilização de aditivo superplastificante, apresentados na Tabela 28 e Tabela 29, é possível inferir que a relação água/cimento inicial é preponderante em todos os casos, como anteriormente observado na análise da resistência destes concretos. Os concretos que possuem uma relação água/cimento inicial mais baixa (0,45) apresentam um menor coeficiente de capilaridade.

Os concretos produzidos com AGRC sem aditivo apresentam um teor de água final maior que os seus concretos de referência, devido à quantidade de água adicionada à mistura para que o abatimento fixado fosse atingido, o que resulta em um coeficiente de capilaridade maior a estes concretos em relação à referência. Nos concretos produzidos com

um nível de pré-molhagem de até 80%, percebe-se em todas as relações água/cimento iniciais, uma redução dos coeficientes de capilaridade, possivelmente, em função da utilização da pré-molhagem. Já nos concretos com o nível de pré-molhagem de 100%, ocorre um aumento no valor destes coeficientes. Tal comportamento indica que nos menores teores de pré-molhagem, a quantidade de água adicionada ao concreto em busca da correção do abatimento, resultou em uma argamassa mais porosa, pois apesar do teor de água final de todas as misturas ser similar (variando entre 10,4 e 11,2%) aparentemente, parte desta água se manteve na argamassa e não chegou a preencher os vazios do agregado, o que iria garantir uma distribuição homogênea de água no concreto.

Comparando os níveis de pré-molhagem adotados, observa-se que para os concretos produzidos com AGRC sem aditivo, com um nível de 80% de pré-molhagem, foi necessário complementar o teor de água com uma menor quantidade da mesma, resultando em uma menor capilaridade para concretos produzidos com este teor de pré-molhagem. Ou seja, para os concretos produzidos com AGRC sem aditivo, os melhores resultados de capilaridade foram obtidos com um teor de 80% de pré-molhagem.

Em relação aos concretos produzidos com aditivo, o teor total de água da mistura apresenta-se menor do que o teor de água apresentado por todos os concretos produzidos sem aditivo, variando entre 9,4 e 10,1%. Nos concretos produzidos com AGRC e aditivo, também é possível perceber que a capilaridade destes concretos aumenta, conforme o aumento da relação água/cimento inicial. Observa-se ainda que todos os concretos produzidos com aditivo possuem coeficientes de capilaridade similares, e inferiores aos dos concretos sem aditivo, possivelmente em função da redução do teor de água total em seus concretos de referência (de 9,2% para 8,74%).

O aumento dos níveis de pré-molhagem, nos concretos com AGRC e aditivo, resulta em maiores coeficientes de capilaridade. Considerando-se que não houve acréscimo de água para a correção do abatimento, acredita-se que há uma migração de parte da água da argamassa para o interior dos agregados, mais expressiva nos menores teores de pré-molhagem. Em vista disso, o teor de pré-molhagem de 40% foi o que apresentou os menores coeficientes de capilaridade (cerca de 20% menores do que os coeficientes de capilaridade apresentados pelos teores de pré-molhagem de 60 e 80%).

Análise estatística:

Concretos produzidos com AGRC sem aditivo:

A análise de variância e os parâmetros calculados para as variáveis independentes (fatores) analisadas para os concretos produzidos com AGRC sem aditivo estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – ANOVA para a absorção de água por capilaridade - concretos com AGRC sem aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste <i>F</i>	Valor <i>p</i>	Significância
AC _i	0,00482222	2	0,00241111	22,84	0,0000	S
PM	0,00271944	3	0,000906481	8,59	0,0005	S
AC _i *PM	0,00108889	6	0,000181481	1,72	0,1596	NS
Resíduos	0,00253333	24	0,000105556			
Total (corrigido)	0,0111639	35				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada; S = significativa; NS = não significativa.

Através da análise de variância apresentada na Tabela 30, é possível afirmar que os fatores AC_i e PM apresentam um efeito estatisticamente significativo sobre a absorção de água por capilaridade dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo, o que confirma os resultados analisados, onde estes concretos apresentaram uma maior absorção de água para maiores relações água/cimento iniciais. E em relação ao teor de pré-molhagem, pode-se perceber, ao final dos 60 minutos de ensaio, que os concretos produzidos com um percentual de 40% apresentaram uma menor absorção de água, ou seja, são concretos menos porosos, o que indica maior durabilidade.

Ao analisar a interação entre AC_i*PM é possível concluir que esta interação não é estatisticamente significativa em relação à absorção de água por capilaridade dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

Concretos produzidos com AGRC com aditivo:

A análise de variância para as variáveis independentes (fatores) analisadas, para os concretos produzidos com AGRC com aditivo é apresentada na Tabela 31, e comprova as conclusões anteriormente apresentadas para estes concretos.

Tabela 31 – ANOVA para a absorção de água por capilaridade - concretos com AGRC com aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste <i>F</i>	Valor <i>p</i>	Significância
AC _i	0,00125185	2	0,000625926	4,83	0,0210	S
PM	0,00642963	2	0,00321481	24,80	0,0000	S
AC _i *PM	0,000503704	4	0,000125926	0,97	0,4473	NS
Resíduos	0,00233333	18	0,00012963			
Total (corrigido)	0,0105185	26				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada; S = significativa; NS = não significativa.

Através da análise de variância apresentada na Tabela 31 é possível observar que os fatores AC_i e PM são estatisticamente significativos. Ao analisar a interação AC_i*PM esta pode ser definida estatisticamente como não significativa.

Concretos produzidos com AGRC com e sem aditivo:

A análise de variância para as variáveis independentes (fatores) analisadas para os concretos produzidos com AGRC são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – ANOVA para a absorção de água por capilaridade - concretos com AGRC com e sem aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
AC_i	0,00514444	2	0,00257222	22,7	0,0000	S
PM	0,00217778	2	0,00108889	9,64	0,0004	S
AD	0,0174241	1	0,0174241	154,25	0,0000	S
AC_i*PM	0,000777778	4	0,000194444	1,72	0,1667	NS
AC_i*AD	0,00047037	2	0,000235185	2,08	0,1394	NS
PM*AD	0,00694815	2	0,00347407	30,75	0,0000	S
$AC_i*PM*AD$	0,000674074	4	0,000168519	1,49	0,2251	NS
Resíduos	0,00406667	36	0,000112963			
Total (corrigido)	0,0376833	53				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; AD = aditivo; SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada; S = significante; NS = não significante.

Através da análise de variância realizada (Tabela 32), os três fatores apresentados podem ser denominados estatisticamente como significativos para um nível de confiabilidade de 95%. Ao analisar as interações dos fatores apresentados, verifica-se que apenas a interação entre PM*AD pode ser denominada estatisticamente como significante, enquanto as demais interações apresentadas são denominadas estatisticamente não significativas para a análise apresentada, resultados estes que confirmam as conclusões anteriormente apresentadas para estes concretos.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA AS ARGAMASSAS EXTRAÍDAS DOS CONCRETOS PRODUZIDOS

Os resultados do ensaio de variação do teor de vazios, realizado nas argamassas extraídas, em diferentes idades, de um mesmo concreto, com o intuito de analisar a influência da movimentação de água em sua porosidade, são apresentados a seguir. Para a realização deste ensaio, foram moldadas 4 amostras de argamassa, retiradas de cada concreto produzido, ensaiadas aos 3 dias de idade. Os valores obtidos individualmente para cada uma das quatro amostras ensaiadas são apresentados no Apêndice D. Os dados obtidos foram tratados estatisticamente e os resultados são apresentados na sequência.

Argamassas extraídas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo:

As médias calculadas a partir dos resultados obtidos para as amostras de argamassa extraídas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo, em cada intervalo de tempo definido, são apresentadas na Tabela 33.

Tabela 33 – Médias e coeficientes de variação para os resultados da determinação da quantidade de vazios das amostras de argamassa retiradas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo e suas amostras de referência, durante os tempos pré-determinados.

Tempo (min)	Quantidade de vazios (g/cm ³) e coeficientes de variação		
	T01-45 REF	T02-55 REF	T03-65 REF
10	0,20 (0,02)	0,21 (0,01)	0,23 (0,01)
30	0,22 (0,01)	0,22 (0,01)	0,23 (0,01)
60	0,21 (0,01)	0,22 (0,01)	0,22 (0,00)
90	0,21 (0,00)	0,21 (0,00)	0,22 (0,00)
120	0,21 (0,01)	0,21 (0,00)	0,22 (0,00)
	T40-45	T40-55	T40-65
10	0,24 (0,00)	0,24 (0,01)	0,24 (0,01)
30	0,25 (0,00)	0,24 (0,01)	0,25 (0,01)
60	0,24 (0,01)	0,23 (0,00)	0,24 (0,01)
90	0,24 (0,01)	0,23 (0,01)	0,23 (0,00)
120	0,23 (0,00)	0,23 (0,01)	0,23 (0,01)
	T60-45	T60-55	T60-65
10	0,22 (0,01)	0,22 (0,01)	0,21 (0,02)
30	0,22 (0,01)	0,22 (0,01)	0,22 (0,01)
60	0,22 (0,01)	0,20 (0,01)	0,22 (0,02)
90	0,21 (0,00)	0,21 (0,01)	0,22 (0,01)
120	0,21 (0,01)	0,21 (0,01)	0,22 (0,01)
	T80-45	T80-55	T80-65
10	0,22 (0,00)	0,22 (0,01)	0,23 (0,01)
30	0,22 (0,01)	0,22 (0,01)	0,23 (0,00)
60	0,22 (0,01)	0,23 (0,00)	0,23 (0,01)
90	0,22 (0,01)	0,22 (0,00)	0,22 (0,01)
120	0,22 (0,00)	0,23 (0,01)	0,23 (0,00)
	T100-45	T100-55	T100-65
10	0,23 (0,01)	0,22 (0,02)	0,22 (0,01)
30	0,22 (0,01)	0,23 (0,01)	0,22 (0,01)
60	0,22 (0,00)	0,22 (0,00)	0,22 (0,00)
90	0,22 (0,00)	0,20 (0,01)	0,22 (0,01)
120	0,21 (0,01)	0,21 (0,01)	0,21 (0,01)

Nas argamassas extraídas dos concretos com AGRC sem aditivo, há uma tendência à manutenção ou à diminuição do seu teor de vazios. Esta tendência, entretanto, é pouco expressiva. Tal fato pode ser atribuído a dois fatores principais: em função de questões técnicas, as primeiras avaliações de volume de vazios se deram após 10 minutos da mistura com a água (e a maior absorção de água pelo agregado ocorre nos primeiros minutos), e as

variações esperadas não são muito elevadas (pois o teor de vazios dos agregados reciclados não é muito grande proporcionalmente à massa do concreto).

Os resultados apresentados na Tabela 33 demonstram que os maiores volumes de poros encontram-se nos níveis de pré-molhagem mais baixos, corroborando os resultados apresentados para a absorção de água por capilaridade dos concretos. Os níveis de 60 e 80% de pré-molhagem apresentaram quantidades de vazios similares à referência, e o nível de 40% apresentou uma porosidade maior, que pode ser explicada através da quantidade de água acrescentada à mistura para a correção do abatimento destes concretos.

Os resultados apresentados pelas amostras de argamassa extraídas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo e suas amostras de referência, condizem com os resultados apresentados no ensaio de capilaridade dos concretos com AGRC sem aditivo e seus concretos de referência, produzidos com AGN.

Argamassas extraídas dos concretos produzidos com AGRC com aditivo:

As médias calculadas a partir dos resultados obtidos para as amostras de argamassa extraídas dos concretos produzidos com AGRC com aditivo e suas amostras de referência, em cada intervalo de tempo definido, são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 – Médias e coeficientes de variação para os resultados da determinação da quantidade de vazios das amostras de argamassa retiradas dos concretos produzidos com AGRC com aditivo e suas amostras de referência, durante os tempos pré-determinados.

Tempo (min)	Quantidade de vazios (g/cm ³) e coeficientes de variação		
	T01-45A REF	T02-55A REF	T03-65A REF
10	0,20 (0,01)	0,21 (0,00)	0,23 (0,01)
30	0,21 (0,00)	0,21 (0,00)	0,22 (0,01)
60	0,21 (0,00)	0,22 (0,02)	0,21 (0,01)
90	0,21 (0,00)	0,20 (0,01)	0,21 (0,01)
120	0,21 (0,00)	0,20 (0,01)	0,21 (0,01)
	T40-45A	T40-55^a	T40-65A
10	0,19 (0,01)	0,20 (0,01)	0,20 (0,01)
30	0,19 (0,00)	0,20 (0,01)	0,19 (0,01)
60	0,19 (0,01)	0,20 (0,00)	0,20 (0,00)
90	0,20 (0,01)	0,20 (0,00)	0,19 (0,00)
120	0,20 (0,00)	0,19 (0,00)	0,19 (0,01)
	T60-45A	T60-55^a	T60-65A
10	0,19 (0,00)	0,20 (0,01)	0,20 (0,00)
30	0,20 (0,00)	0,20 (0,01)	0,21 (0,00)
60	0,20 (0,01)	0,21 (0,00)	0,19 (0,01)
90	0,19 (0,01)	0,20 (0,01)	0,19 (0,00)
120	0,20 (0,00)	0,19 (0,01)	0,18 (0,01)
	T80-45A	T80-55^a	T80-65A
10	0,19 (0,01)	0,21 (0,01)	0,22 (0,00)
30	0,20 (0,01)	0,22 (0,00)	0,21 (0,01)
60	0,21 (0,00)	0,21 (0,00)	0,21 (0,01)
90	0,21 (0,00)	0,22 (0,01)	0,21 (0,01)
120	0,20 (0,00)	0,21 (0,00)	0,21 (0,00)

Realizando-se uma análise global dos resultados apresentados pela Tabela 34, é possível observar que a quantidade de vazios nas amostras produzidas com aditivo é menor do que a quantidade de vazios apresentada pelas amostras produzidas sem aditivo, coincidindo com a expectativa inicial e com os coeficientes de capilaridade encontrados para estes concretos.

As diferenças entre as quantidades de vazios das argamassas extraídas dos concretos de referência são muito pequenas, somente sendo possível fazer uma estimativa de tendências. Também é possível perceber que uma maior relação água/cimento inicial resulta em argamassas mais porosas, resultados similares aos apresentados para a capilaridade dos concretos.

Análise estatística:

Concretos produzidos com AGRC sem aditivo:

A análise de variância dos fatores de controle e das suas interações, observado se o efeito destes fatores é significativo para o comportamento da variável de resposta para as argamassas extraídas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – ANOVA para a porosidade – argamassas dos concretos com AGRC sem aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
AC _i	0,000205833	2	0,000102917	1,02	0,3624	NS
PM	0,0161633	3	0,00538778	53,43	0,0000	S
T	0,00221667	4	0,000554167	5,50	0,0003	S
AC _i *PM	0,000884167	6	0,000147361	1,46	0,1939	NS
AC _i *T	0,000360833	8	0,0000451042	0,45	0,8911	NS
PM*T	0,00177	12	0,0001475	1,46	0,1419	NS
AC _i *PM*T	0,0031825	24	0,000132604	1,32	0,1592	NS
Resíduos	0,01815	180	0,000100833			
Total (corrigido)	0,0429333	239				

Onde: AC_i = relação a/c inicial; PM = teor de pré-molhagem; T = tempo; SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada; S = significativa; NS = não significativa.

Observa-se a partir da Tabela 35 que apenas os fatores PM e T influenciaram na porosidade das amostras, os exemplares com menor teor de PM geraram concretos mais porosos e a porosidade diminui em função do tempo.

Nos concretos onde há uma menor PM, foi necessário se compensar a quantidade de água da mistura, o que resultou em uma maior porosidade. Ao se avaliar a influência do tempo de coleta da amostra, observa-se que em geral, a porosidade nas argamassas, quando retiradas após maior tempo de contato com o AGRC, diminui. As amostras produzidas com 60, 80 e 100% de pré-molhagem apresentaram um comportamento similar, enquanto que nas amostras produzidas com um teor de 40% de pré-molhagem, o volume de vazios aumentou cerca de 10%, sendo esta a pior condição de pré-molhagem para estes concretos. Este comportamento se apresenta coerente com o comportamento apresentado no ensaio de capilaridade dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

Concretos produzidos com AGRC com aditivo:

A análise de variância para as variáveis independentes (fatores) analisadas, para as argamassas extraídas dos concretos produzidos com AGRC com aditivo é apresentada na Tabela 36.

Tabela 36 – ANOVA para a porosidade – argamassas dos concretos com AGRC com aditivo.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste <i>F</i>	Valor <i>p</i>	Significância
AC _i	0,00185871	2	0,000929355	22,47	0,0000	S
PM	0,00775327	2	0,00387664	93,74	0,0000	S
T	0,000620444	4	0,000155111	3,75	0,0063	S
AC _i *PM	0,00126077	4	0,000315192	7,62	0,0000	S
AC _i *T	0,00179984	8	0,00022498	5,44	0,0000	S
PM*T	0,00106368	8	0,00013296	3,22	0,0023	S
AC _i *PM*T	0,00142586	16	0,0000891163	2,15	0,0093	S
Resíduos	0,00554167	134	0,0000413557			
Total (corrigido)	0,0213385	178				

Onde: AC_i = relação a/c; PM = teor de pré-molhagem; T = tempo; SQ = soma quadrada; GL = grau de liberdade; MQ = média quadrada; S = significativa; NS = não significativa.

Conforme apresentado na análise estatística da Tabela 36, o teor de pré-molhagem dos concretos é o fator mais significativo estatisticamente, podendo-se observar que um teor de 80% de pré-molhagem resulta em argamassas com maior quantidade de vazios, o que está coerente com a capilaridade do concreto, onde se verificou que os menores coeficientes de absorção foram encontrados nos concretos produzidos com AGRC e aditivo, com um teor de pré-molhagem de 40%.

Não é possível se observar uma tendência de comportamento para as diferenças de relação água/cimento e tempo. Apesar de estatisticamente significativos, estes apresentam baixo valor no Teste *F*, o que justifica a dificuldade de identificar uma tendência de comportamento.

5 CONCLUSÃO

No capítulo que conclui este trabalho são apresentadas as considerações finais em relação aos objetivos estabelecidos, bem como sugestões para trabalhos futuros oriundas de questionamentos evidenciados na condução da pesquisa e na análise dos resultados, e que não puderam ser contempladas no escopo do mesmo.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo verificar a influência de diferentes teores de pré-molhagem de AGRC (testados nos percentuais de 40, 60, 80 e 100%) nas propriedades de novos concretos com o agregado reciclado, com e sem o uso de aditivo superplastificante.

Considerando-se os resultados obtidos, e tendo em vista os objetivos estabelecidos no presente trabalho, são apresentadas as seguintes considerações finais: A perda de abatimento dos concretos, sofre pequena influência da pré-molhagem, mas é influenciada pelo uso de aditivo superplastificante, que resulta em uma queda maior de trabalhabilidade na primeira meia hora. A pré-molhagem não se mostrou significativa na determinação da resistência à compressão, que é influenciada pela relação água/cimento inicial da mistura. Entretanto, sob o ponto de vista da durabilidade, avaliada a partir da permeabilidade à água e do teor de vazios existente na argamassa da mistura, a pré-molhagem influencia significativamente o comportamento dos concretos testados: nos concretos com AGRC sem aditivo, há pequenas variações de permeabilidade e porosidade, sendo que o teor de pré-molhagem de 80% resulta em concretos menos porosos. Entretanto, nos concretos com AGRC e aditivo superplastificante, o menor teor de pré-molhagem testado (40%) se revela a melhor opção, pois a água de mistura é absorvida pelos poros vazios do agregado reciclado, o que diminui a porosidade da argamassa, e conseqüentemente a capilaridade do concreto.

De modo mais específico, e com embasamento em análise estatística, pode-se chegar às seguintes conclusões:

Sobre a trabalhabilidade do concreto fresco:

- Os valores obtidos no ensaio de trabalhabilidade ao longo do tempo dos concretos de referência produzidos sem aditivo foram similares para as três relações água/cimento iniciais apresentadas.
- Os concretos produzidos com AGRC sem aditivo demandaram até 10% mais água para que o abatimento estabelecido fosse atingido, quando

comparados aos seus concretos de referência e com os concretos produzidos com AGRC produzidos com aditivo.

- O aumento do teor de pré-molhagem resultou na necessidade de uma menor quantidade de água na mistura para que o abatimento especificado fosse atingido. E é possível afirmar que a diminuição no teor de água da mistura é inversamente proporcional à quantidade de água de pré-molhagem utilizada, o que resulta em uma quantidade de água total (H total) similar para todos os traços de concreto produzidos sem aditivo, e podem ser verificadas perdas de abatimento similares para estes concretos.
- Os concretos produzidos com AGRC e aditivo apresentaram uma considerável queda de abatimento nos primeiros 30 minutos de ensaio, devido à aparente perda do efeito ao aditivo utilizado.
- Os concretos de referência produzidos com aditivo apresentaram abatimentos iniciais iguais para as três relações água/cimento iniciais, porém, a partir dos 30 minutos de ensaio, já ocorreram variações em relação aos resultados de abatimento, na ordem de até 20 mm.
- Comparando-se as perdas de abatimento dos concretos de referência, ao longo do tempo, em relação ao uso ou não de aditivo nas misturas, foi constatado que nos concretos onde o aditivo foi utilizado, houve um acréscimo na queda do abatimento nos primeiros 30 minutos de ensaio, e este foi sendo atenuado gradativamente. Entretanto, a diferença de abatimento, ocorrida na ordem de até 10 mm, é considerada pouco relevante e se encontra dentro limite tolerado para o ensaio (de até 20 mm, segundo a NBR 67: 1998).
- Comparando estes concretos, em relação aos resultados apresentados para o ensaio de abatimento, percebe-se que os concretos com AGRC com aditivo apresentaram uma maior perda de abatimento ao final do ensaio em relação aos concretos produzidos com AGRC sem aditivo. A maior perda de abatimento foi verificada nos traços com níveis de pré-molhagem de 40 e 60%.

- Avaliando-se o comportamento destes concretos ao longo do tempo, observou-se que o aumento do teor de pré-molhagem, até 80%, é inversamente proporcional à perda de abatimento, o que possibilita concluir que o teor de pré-molhagem que menos influencia o abatimento está entre 60 e 80%.
- Os concretos com AGRC produzidos com aditivo e com um nível de 80% de pré-molhagem sofreram uma perda menor de abatimento até o tempo final do ensaio.

Sobre o comportamento da resistência à compressão axial aos 28 dias:

- Apesar das quantidades totais de água (mistura + pré-molhagem) variarem entre os traços, para um mesmo nível de pré-molhagem, todos os concretos que possuem uma relação água/cimento inicial mais baixa apresentam uma maior resistência, o que indica que a relação água/cimento inicial é um fator mais relevante que o teor total de água da mistura, para a resistência à compressão.
- Nos concretos com AGRC sem aditivo, o teor de 60% de pré-molhagem apresentou uma tendência a valores mais altos para a resistência à compressão, porém esta tendência não se apresentou significativa em relação aos demais na análise estatística.
- Nos concretos com AGRC e aditivo observam-se variações na resistência entre os diversos concretos, porém, na análise estatística realizada, o fator PM não se apresenta significativo em relação à resistência.
- Não foi possível observar diferença na resistência dos concretos com AGRC produzidos com aditivo superplastificante, em relação aos concretos com AGRC produzidos sem aditivo. Estima-se que a resistência destes concretos não foi maior com o uso de aditivo devido à influência da porosidade apresentada pelo agregado reciclado e a influência da argamassa antiga aderida a este agregado.

Sobre os resultados de absorção de água por capilaridade dos concretos:

- Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade para os concretos com AGRC produzidos com e sem aditivo demonstraram que quanto maior a relação água/cimento inicial das misturas, maior é a absorção de água dos concretos, seguindo o mesmo comportamento constatado nos resultados de resistência à compressão.
- Há uma maior absorção de água em todos os concretos produzidos sem a utilização de aditivo, e isto se deve ao fato de que para atingir o valor do abatimento fixado para os concretos, foi necessário acrescentar à mistura uma maior quantidade de água, que unida a uma eventual migração de água entre o AGRC e a argamassa podem ter ocasionado alterações na distribuição de poros, resultando em uma maior absorção de água destes concretos.
- Nos concretos produzidos com AGRC sem aditivo, foi possível perceber ao final dos 60 minutos de ensaio que os concretos produzidos com os menores percentuais de pré-molhagem (40 e 60%) apresentaram uma maior absorção de água. Este comportamento pode ser explicado através da quantidade de água inicial dos concretos produzidos com AGRC, ou seja, os concretos com um teor de pré-molhagem de 40% necessitaram de uma maior quantidade de água na mistura para atingir o abatimento definido, o que implica em um maior coeficiente de capilaridade.
- O teor de pré-molhagem de 80% gerou concretos com AGRC sem aditivo com uma menor absorção de água, o que provavelmente proporcionará uma maior durabilidade a estes concretos.
- Nos concretos produzidos com AGRC com aditivo, quanto maior a relação água/cimento inicial das misturas, assim como o nível de pré-molhagem, maior foi a absorção de água dos concretos. Este comportamento não foi verificado nos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.
- Ao final dos 60 minutos de ensaio, os concretos produzidos com um percentual de pré-molhagem de 40% apresentaram uma menor absorção de água, ou seja, são concretos menos porosos e devem resultar em concretos mais duráveis.

- No teor de 40% de pré-molhagem, o uso de aditivo resulta em um menor coeficiente de capilaridade.
- A pré-molhagem é muito influente no coeficiente de capilaridade destes concretos, pois nos teores de 60 e 80% de pré-molhagem, este coeficiente aumenta em relação ao concreto de referência, já para o teor de 40% de pré-molhagem, o coeficiente de capilaridade é diminuído em relação a esta referência. Isto leva a crer que exista uma migração da água da argamassa para o AGRC, diminuindo, assim, a capilaridade destes concretos.

Sobre as alterações na porosidade das argamassas extraídas destes concretos:

- Verificou-se uma diferença muito pequena na quantidade de vazios das argamassas extraídas dos concretos de referência produzidos com e sem aditivo. Nos dois tipos de concreto, há uma tendência que uma maior relação água/cimento inicial resulte em argamassas mais porosas.
- As argamassas extraídas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo apresentam uma maior quantidade de vazios que as argamassas de referência, o que coincide com os resultados apresentados no ensaio de absorção de água por capilaridade para estes concretos. Este aumento em relação à quantidade de vazios para as argamassas extraídas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo pode ser explicado através da quantidade de água acrescentada à mistura para a correção do abatimento destes concretos.
- As argamassas extraídas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo apresentam um maior volume de poros para os menores teores de pré-molhagem. A maior quantidade de vazios é encontrada nas amostras produzidas com um nível de pré-molhagem de 40%, enquanto os demais níveis apresentaram amostras com quantidades menores de vazios.
- As argamassas extraídas dos concretos produzidos com AGRC com aditivo apresentam uma menor porosidade com um menor nível de pré-molhagem, pois aparentemente ocorre migração de água da argamassa para o agregado reciclado.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em uma única pesquisa não é possível esgotar todas as possibilidades de estudo sobre o comportamento de um determinado material, e levando em consideração os questionamentos evidenciados a partir deste estudo, dos quais não puderam ser contemplados no escopo do trabalho, são estabelecidas as seguintes recomendações para os trabalhos futuros:

- Testar o método de pré-molhagem proposto nesta pesquisa através de outros materiais, com porosidade diferente da utilizada neste trabalho;
- Realizar um estudo acerca da influência da pré-molhagem em outras propriedades dos concretos produzidos com AGRC, nos mesmos moldes realizados, incluindo as propriedades que permitem avaliar o desempenho e sua durabilidade (profundidade de carbonatação e cloretos);
- Realizar uma análise das características relativas às zonas de transição pasta-AGRC dos diferentes concretos produzidos nesta pesquisa, através de microscopia eletrônica;
- Avaliar a influência do método utilizado para a pré-molhagem nas propriedades dos concretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, A.; FATHIFAZL, G.; FOURNIER, B.; ISGOR, O. B.; ZAVADIL, R., RAZAQPUR, A. G.; FOO, S. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. **Materials characterization**. v. 60, p. 716-728, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 150. **Standard specification for Portland cement**. Philadelphia, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 187. **Standard test method for normal consistency of hydraulic cement**. Philadelphia, 1998.

AMORIM, P. M. E. **Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão**. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de construção e demolição de reciclados**. 2000. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. 2003. São Paulo, 2003.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 167f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2005.

ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 2011. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45: 2006**. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 53: 2009**. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 67: 1998**. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248: 2003**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 5738: 2003**. Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739: 2007**. Concreto – Ensaio de compressão com corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118: 2007**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211: 2009**. Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10342: 2012**. Concreto – Perda de abatimento – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15116: 2004**. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15575-1: 2012**. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2012.

BARRA, M. **Estúdio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado em sua aplicación como hormigón armado**. 1996. 223f. Tese (Doutorado), Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 1996.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2012.

BERNDT, M. L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. **Construction and building materials**. v. 23, p.2606-2613, 2009.

BJEGOVIĆ, D.; STIRMER, N.; SERDAR, M. Ecological Aspects of Concrete Production. In: **Second international conference on sustainable construction materials and technologies**, Ancona, Italia, 2010.

BRASIL – Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Brasília, 2010.

BRITO, J. de. **Agregados reciclados e a sua influência nas propriedades dos betões**. 2005. Lição de síntese para provas de agregação em Engenharia Civil, Lisboa, 2005.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. **Cement and concrete research**. v. 41, p.1037-1049, 2011.

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

BUTTNER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. 499f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.

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

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados de RCD. **Revista Minerva**. v. 4, p. 75-84, 2007.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*. v. 24, p.421-430, 2010.

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

CARVALHO, J. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada à construção civil – Estudo de caso: Comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos**. 2002. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

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

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. 2011. Disponível em: <http://www.cbic.org.br>, acesso em: 19 de novembro de 2011.

CIMENTO.ORG. 2012. **Cimento** Brasil. Disponível em:

http://www.cimento.org/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=18.
Acesso em 27 de dezembro de 2012.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo de concreto**. 2011. 75f. Qualificação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

COUTINHO, A. **Fabrico e propriedades do betão**. Vol. I, II e III, LNEC, Lisboa, 2000.

COUTINHO, A. **Fabrico e propriedades do betão**. Vol. I e II, LNEC, Lisboa, 2006.

DAL MOLIN, D. C. C.; KULAKOWISKI, M. P.; RIBEIRO, J. L. D. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil. **Ambiente Construído**. v. 5, p. 37-49, 2005.

DAMINELI, B. L. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2007. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

DOMINGO-CABO, A.; LÁZARO C.; LÓPEZ-GAYARRE, F.; SERRANO-LÓPEZ, M. A.; SERNA, P.; CASTAÑO-TABARES, J. O. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. **Construction and building materials**. 2009.

ETXEBERRIA, M. **Experimental study on microstructure and structural behavior**. 2004. 182f. Tese (Doutorado) - Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, Espanha 2004.

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, p. 735-742, 2007.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza da casca de arroz na penetração de íons cloreto em concretos com agregado reciclado de concreto**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2013.

FERREIRA, L. M. M. **Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão. Influência da pré-saturação**. 2007. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

FONSECA, F. B. **Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição**. 2008. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FONSECA, N. M. S. **Betões estruturais com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão – Influência das condições de cura no desempenho mecânico**. 2009. 249f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

GOMES, M. **Betões estruturais com incorporação de agregados reciclados de betão e cerâmicos com reboco**. 2007. Dissertação (Mestrado em Construção) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; EIRAS-LÓPEZ, J.; SEARAPAZ, S. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. **Materials and Structures**. v. 44, p. 1759-1771, 2011.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI. 349f. 1992.

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

ISAIA, G. C. **A Evolução do concreto estrutural**. Concreto: Ciência e Tecnologia. v. 1. Editor Geraldo C. Isaia – IBRACON, São Paulo. 2011.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and building materials**. v. 23, 2009.

KOHNO, K.; OKAMOTO, T.; ISIKAWA, Y.; SIBATA, T.; MORI, H. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete. **Cement and concrete research**. v. 29, n. 4, p. 611-14, 1999.

KONG, D.; LEI, T.; ZHENG, J. Effect and mechanism of surface-coating pozzolanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and building materials**. v. 24, n. 5, p. 701-08, 2010.

KOU, S. C.; POON, C. S.; CHAN, D. Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. **Materials and structures**. v. 41, p. 1191-1201, 2008.

LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEITE, M. B.; CORDEIRO, L. N. P., MASUERO, A. B., DAL MOLIN, D. C. C **Proposta de adaptação do procedimento proposto por Leite (2001) para determinação da absorção de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição.** In Congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas, 7º, 2011. Fortaleza. Anais CINPAR, 2011.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** 2001. 194f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. **Construction and building materials.** v. 23, n. 3, p. 1287-91, 2009.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China Part II. Structural behavior of recycled aggregate concrete and engineering applications. **Resources, conservation and recycling.** n. 3, v. 53, p. 107-112, 2009.

LIMBACHIYA, M. C. Recycled aggregates: production, properties and value-added sustainable applications. **Journal of Wuhan University of Technology-Master.** Sci. Ed., 2010.

LÓPEZ-GAYARRE, F; SERNA, P.; DOMINGO-CABO, A.; SERRANO-LÓPEZ, M. A.; LÓPEZ-COLINA, C. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria of recycled concrete properties. **Waste management.** v. 12, p. 3022-3028, 2009.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.** 2007. 180f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

MALESEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIC, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. **Sustainability.** 2010.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to Cradle: Remaking the way we make things.** v. 1 208f. Nova York: Editora North Point Press, 2002.

MEDDAH, M. S.; SUZUKI, M.; SATO, R. Influence of a combination of expansive and shrinkage-reducing admixture on autogenous deformation and self-stress of silica fume high-performance concrete. **Construction and building materials.** p. 239-250, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008. 573f.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 1923. Tradução: Eng. Salvador E. Giammusso. 2ª ed. rev. atual. São Paulo: Editora Pini, 1997.

NUNES, W. C. **Influência do agregado graúdo reciclado de construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S. Estudo para o aproveitamento de concretos provenientes de demolição de obras de construção civil e seu comportamento em relação ao meio ambiente. 1999. In: **Congresso brasileiro de concreto**, 41. Anais. Salvador: Editora Ibracon Salvador, 1999.

PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 829-836, 2009.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 2008. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção – estudo do uso em argamassas**. 1986. 148f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Arquitetura e Planejamento, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia da Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

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. 2004. **Cement and concrete research**. v. 34. p. 31-36. 2004.

RILEM, C. Determination of the Capillary Absorption of Water of Hardened Concrete: TC 166 PCD. **Materials and structures / Materiaux et constructions**, v. 32, p. 178-179, Abr. 1999.

SANCHEZ, M. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural**. Tese (Doutorado em Construção) – Universidade Politécnica de Madri, Madri, 2004.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório anual 2011. Disponível em: http://www.snic.org.br/25set1024/snic_relat2011-12.html Acesso em: 18 Nov. 2012.

TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and building materials**, v. 23, p. 1163-1167, 2009.

TAM, C. M.; TAM, V. W. Y.; GAO, X. F. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. 2005. **Cement and concrete research**. v. 35 (2005) p. 1195-1203. 2005.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. **Construction and building materials**. v. 22, n. 10, p. 2068077, 2008.

TEGGUER, A. D. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. **Construction and building materials**. v. 27, n. 1, p. 112-116, 2012.

TERZIAN, P. Concreto Pré-Fabricado In: **Isaia, Geraldo. Concreto: Ensino, pesquisas e realizações**. Editora IBRACON, v. 2, 2005.

TOPÇU, I. B.; SENDEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. 2004. **Cement and concrete research**. v. 34, p. 1307-1312, 2004.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

VALLE, C. E. **Qualidade ambiental: ISO 14000**. São Paulo - SP: Editora Senac, 5° ed., 195f. 2004.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons de cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre - RS, 2003. 151f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente construído**, Porto Alegre. v. 4, p. 47-63, 2004.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação**. 2010. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

WERLE, A. P.; KULAKOWSKI, M. P.; KAZMIERCZAK, C. S. **Manual de montagem e operação de câmara de carbonatação**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Unisinos, 2010.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 1187-1194, 2005.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. 1997. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 1997.

APÊNDICE A

Tabela A1 – Temperatura e umidade relativa do ar, referentes ao momento de moldagem dos concretos produzidos durante a pesquisa.

Traço	Data	Hora	Temperatura (°C)	U. R. (%)
T01-45 REF	02/10/2012	14:53	19,1	80
T02-55 REF	02/10/2012	17:00	19,0	85
T03-65 REF	02/10/2012	19:10	18,7	89
T40-45	18/09/2012	10:17	19,3	90
T40-55	18/09/2012	13:25	19,1	92
T40-65	18/09/2012	15:47	19,1	92
T60-45	11/09/2012	9:50	17,8	92
T60-55	11/09/2012	12:58	20,5	79
T60-65	11/09/2012	15:35	20,7	78
T80-45	28/08/2012	10:18	14,7	81
T80-55	28/08/2012	13:34	16,2	85
T80-65	28/08/2012	16:08	15,8	83
T100-45	25/09/2012	10:03	14,7	58
T100-55	25/09/2012	12:22	14,8	56
T100-65	25/09/2012	14:39	17,2	51
T01-45A REF	13/11/2012	10:14	20,0	66
T02-55A REF	13/11/2012	12:42	21,5	59
T03-65A REF	13/11/2012	15:31	24,6	59
T40-45A	06/11/2012	10:20	21,2	65
T40-55A	06/11/2012	12:35	27,1	43
T40-65A	06/11/2012	14:46	29,5	30
T60-45A	23/10/2012	10:07	23,1	69
T60-55A	23/10/2012	13:24	26,0	55
T60-65A	23/10/2012	15:58	27,4	37
T80-45A	16/10/2012	10:49	21,1	68
T80-55A	16/10/2012	13:16	24,6	58
T80-65A	16/10/2012	15:56	26,1	65

APÊNDICE B

Tabela B1 – Resultados observados nos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para os concretos produzidos (MPa).

Traço	Teor de Saturação (%)	a/c inicial	a/c final	fc (MPa)	fc Média (MPa)
T01-45 REF	0	0,45	0,45	46,30	39,67
T01-45 REF	0	0,45	0,45	34,10	
T01-45 REF	0	0,45	0,45	38,60	
T02-55 REF	0	0,55	0,55	38,20	37,80
T02-55 REF	0	0,55	0,55	32,50	
T02-55 REF	0	0,55	0,55	42,70	
T03-65 REF	0	0,65	0,65	32,20	31,57
T03-65 REF	0	0,65	0,65	30,80	
T03-65 REF	0	0,65	0,65	31,70	
T01-45A REF	0	0,43	0,43	48,80	45,97
T01-45A REF	0	0,43	0,43	42,00	
T01-45A REF	0	0,43	0,43	47,10	
T02-55A REF	0	0,52	0,52	35,40	37,73
T02-55A REF	0	0,52	0,52	38,30	
T02-55A REF	0	0,52	0,52	39,50	
T03-65A REF	0	0,62	0,62	32,60	30,23
T03-65A REF	0	0,62	0,62	30,40	
T03-65A REF	0	0,62	0,62	27,70	
T40-45	40	0,45	0,53	44,90	41,25
T40-45	40	0,45	0,53	37,60	
T40-45	40	0,45	0,53		
T40-55	40	0,55	0,65	30,90	32,70
T40-55	40	0,55	0,65	31,40	
T40-55	40	0,55	0,65	35,80	
T40-65	40	0,65	0,77	26,60	27,10
T40-65	40	0,65	0,77	27,90	
T40-65	40	0,65	0,77	26,80	
T60-45	60	0,45	0,51	46,20	45,10
T60-45	60	0,45	0,51	43,90	
T60-45	60	0,45	0,51	45,20	
T60-55	60	0,55	0,62	38,40	34,30
T60-55	60	0,55	0,62	31,10	
T60-55	60	0,55	0,62	33,40	
T60-65	60	0,65	0,73		28,10
T60-65	60	0,65	0,73	27,60	
T60-65	60	0,65	0,73	28,60	

Continuação

Traço	Teor de Saturação	a/c inicial	a/c final	fc (MPa)	fc Média (MPa)
T80-45	80	0,45	0,50	39,30	40,97
T80-45	80	0,45	0,50	34,30	
T80-45	80	0,45	0,50	49,30	
T80-55	80	0,55	0,62	34,00	33,27
T80-55	80	0,55	0,62	30,70	
T80-55	80	0,55	0,62	35,10	
T80-65	80	0,65	0,73	30,20	33,87
T80-65	80	0,65	0,73	33,50	
T80-65	80	0,65	0,73	37,90	
T100-45	100	0,45	0,51	30,60	38,30
T100-45	100	0,45	0,51	42,50	
T100-45	100	0,45	0,51	41,80	
T100-55	100	0,55	0,63	27,50	32,17
T100-55	100	0,55	0,63	35,40	
T100-55	100	0,55	0,63	33,60	
T100-65	100	0,65	0,74	27,80	31,17
T100-65	100	0,65	0,74	32,70	
T100-65	100	0,65	0,74	33,00	
T40-45A	40	0,43	0,46	41,60	41,37
T40-45A	40	0,43	0,46	39,10	
T40-45A	40	0,43	0,46	43,40	
T40-55A	40	0,52	0,56	35,40	34,97
T40-55A	40	0,52	0,56	28,70	
T40-55A	40	0,52	0,56	40,80	
T40-65A	40	0,62	0,66	21,60	27,00
T40-65A	40	0,62	0,66	33,40	
T40-65A	40	0,62	0,66	26,00	
T60-45A	60	0,43	0,47	48,30	42,10
T60-45A	60	0,43	0,47	39,80	
T60-45A	60	0,43	0,47	38,20	
T60-55A	60	0,52	0,58	40,60	40,30
T60-55A	60	0,52	0,58	37,10	
T60-55A	60	0,52	0,58	43,20	
T60-65A	60	0,62	0,69	35,30	33,40
T60-65A	60	0,62	0,69	30,00	
T60-65A	60	0,62	0,69	34,90	

Continuação

Traço	Teor de Saturação	a/c inicial	a/c final	fc (MPa)	fc Média (MPa)
T80-45A	80	0,43	0,49	38,40	40,43
T80-45A	80	0,43	0,49	37,80	
T80-45A	80	0,43	0,49	45,10	
T80-55A	80	0,52	0,60	37,80	37,27
T80-55A	80	0,52	0,60	30,80	
T80-55A	80	0,52	0,60	43,20	
T80-65A	80	0,62	0,71	35,30	34,33
T80-65A	80	0,62	0,71	34,40	
T80-65A	80	0,62	0,71	33,30	

APÊNDICE C

Tabela C1 – Resultados individuais de absorção de água por capilaridade para os concretos de referência produzidos com AGN com e sem aditivo.

Tempo (min)	Absorção por capilaridade (g/cm ²)								
	T01-45 REF			T02-55 REF			T03-65 REF		
	A01	A02	A03	A01	A02	A03	A01	A02	A03
1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
2	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
5	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05
10	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,07
15	0,06	0,07	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08
30	0,09	0,10	0,09	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13	0,12
60	0,13	0,14	0,13	0,16	0,16	0,16	0,17	0,19	0,17
	T01-45A REF			T02-55A REF			T03-65A REF		
	A01	A02	A03	A01	A02	A03	A01	A02	A03
	1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02
2	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
5	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05
10	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04	0,07	0,06	0,07
15	0,07	0,06	0,06	0,08	0,07	0,05	0,09	0,08	0,09
30	0,10	0,08	0,08	0,11	0,10	0,07	0,13	0,11	0,11
60	0,15	0,12	0,12	0,16	0,13	0,11	0,19	0,15	0,16

Tabela C2 – Resultados individuais de absorção de água por capilaridade para os concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

Tempo (min)	Absorção por capilaridade (g/cm ²)								
	T40-45			T40-55			T40-65		
	A01	A02	A03	A01	A02	A03	A01	A02	A03
1	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
2	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
5	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05
10	0,06	0,08	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08
15	0,08	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09
30	0,11	0,13	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,14
60	0,16	0,19	0,16	0,18	0,18	0,18	0,21	0,21	0,19
	T60-45			T60-55			T60-65		
	A01	A02	A03	A01	A02	A03	A01	A02	A03
	1	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04
5	0,04	0,05	0,04	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06
10	0,06	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07	0,08	0,09	0,08
15	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,09	0,10	0,11	0,10
30	0,11	0,12	0,11	0,13	0,14	0,12	0,15	0,16	0,14
60	0,16	0,17	0,16	0,18	0,20	0,18	0,21	0,22	0,20

Continuação

Tempo (min)	Absorção por capilaridade (g/cm ²)								
	T80-45			T80-55			T80-65		
	A01	A02	A03	A01	A02	A03	A01	A02	A03
1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
5	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05
10	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07
15	0,08	0,08	0,07	0,09	0,09	0,08	0,08	0,09	0,08
30	0,11	0,11	0,10	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12
60	0,16	0,16	0,15	0,17	0,17	0,16	0,16	0,18	0,17
	T100-45			T100-55			T100-65		
	A01	A02	A03	A01	A02	A03	A01	A02	A03
1	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
5	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05
10	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07
15	0,08	0,09	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,10	0,09
30	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13	0,12	0,13	0,14	0,12
60	0,16	0,18	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,17

Tabela C3 – Resultados individuais de absorção de água por capilaridade para os concretos produzidos com AGRC com aditivo.

Tempo (min)	Absorção por capilaridade (g/cm ²)								
	T40-45A			T40-55A			T40-65A		
	A01	A02	A03	A01	A02	A03	A01	A02	A03
1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
2	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
5	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03
10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05
15	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06
30	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08	0,10	0,09	0,08
60	0,12	0,12	0,11	0,13	0,12	0,11	0,14	0,13	0,11
	T60-45A			T60-55A			T60-65A		
	A01	A02	A03	A01	A02	A03	A01	A02	A03
1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
5	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
10	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06
15	0,07	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07	0,08	0,09	0,08
30	0,10	0,10	0,09	0,09	0,11	0,10	0,11	0,12	0,11
60	0,15	0,15	0,13	0,13	0,15	0,15	0,16	0,17	0,16

Continuação

Tempo (min)	Absorção por capilaridade (g/cm²)								
	T80-45A			T80-55A			T80-65A		
	A01	A02	A03	A01	A02	A03	A01	A02	A03
1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02
2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
5	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04
10	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,05
15	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,07
30	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,09
60	0,14	0,15	0,14	0,16	0,17	0,16	0,17	0,18	0,14

APÊNDICE D

Tabela D1 – Resultados individuais da determinação da quantidade de vazios das amostras de argamassa retiradas dos concretos de referência, produzidos com AGN com e sem aditivo.

Tempo (min)	Quantidade de vazios (g/cm ³)											
	T01-45 REF				T02-55 REF				T03-65 REF			
	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04
10	0,21	0,20	0,17	0,23	0,21	0,22	0,20	0,21	0,22	0,23	0,22	0,23
30	0,24	0,22	0,21	0,22	0,20	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22
60	0,22	0,21	0,21	0,22	0,23	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
90	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,22
120	0,20	0,21	0,20	0,21	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22
	T01-45A REF				T02-55A REF				T03-65A REF			
	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04
	10	0,20	0,21	0,20	0,19	0,21	0,21	0,21	0,21	0,24	0,23	0,23
30	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23	0,23
60	0,21	0,22	0,21	0,21	0,21	0,26	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,22
90	0,20	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22
120	0,21	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,22	0,19	0,22	0,21

Tabela D2 – Resultados individuais da determinação da quantidade de vazios das amostras de argamassa retiradas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

Tempo (min)	Quantidade de vazios (g/cm ³)											
	T40-45				T40-55				T40-65			
	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04
10	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,23	0,23	0,25	0,24	0,25	0,24
30	0,25	0,24	0,25	0,25	0,23	0,24	0,23	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24
60	0,25	0,23	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23	0,24	0,24
90	0,24	0,23	0,25	0,23	0,22	0,23	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23	0,22
120	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23	0,22	0,23	0,22
	T60-45				T60-55				T60-65			
	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04
	10	0,21	0,21	0,23	0,22	0,23	0,21	0,21	0,24	0,22	0,17	0,21
30	0,23	0,22	0,21	0,21	0,24	0,23	0,21	0,21	0,23	0,23	0,21	0,23
60	0,21	0,23	0,21	0,21	0,17	0,22	0,20	0,20	0,21	0,23	0,23	0,22
90	0,21	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,22	0,22
120	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,21	0,22	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22
	T80-45				T80-55				T80-65			
	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04
	10	0,22	0,22	0,21	0,22	0,19	0,22	0,24	0,22	0,22	0,22	0,24
30	0,23	0,21	0,23	0,22	0,22	0,23	0,21	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23
60	0,21	0,22	0,23	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23	0,23	0,21	0,22	0,24
90	0,21	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23
120	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,24	0,24	0,22	0,23	0,23	0,24	0,23

Continuação

	T100-45				T100-55				T100-65			
	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04
10	0,24	0,22	0,23	0,22	0,24	0,23	0,21	0,20	0,22	0,24	0,22	0,21
30	0,22	0,21	0,22	0,23	0,23	0,22	0,21	0,24	0,22	0,23	0,23	0,21
60	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22
90	0,22	0,22	0,21	0,22	0,21	0,21	0,19	0,21	0,22	0,20	0,24	0,22
120	0,21	0,22	0,21	0,22	0,21	0,21	0,20	0,22	0,21	0,20	0,22	0,21

Tabela D3 – Resultados individuais da determinação da quantidade de vazios das amostras de argamassa retiradas dos concretos produzidos com AGRC sem aditivo.

Tempo (min)	Quantidade de vazios (g/cm ³)											
	T40-45A				T40-55A				T40-65A			
	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04
10	0,18	0,20	0,20	0,18	0,21	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,21	0,20
30	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,20	0,19	0,20	0,20	0,18	0,20	0,19
60	0,20	0,19	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
90	0,20	0,18	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19
120	0,20	0,20	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19	0,20
	T60-45A				T60-55A				T60-65A			
	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04
10	0,18	0,19	0,19	0,19	0,21	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20
30	0,20	0,21	0,20	0,20	0,21	0,19	0,20	0,21	0,20	0,21	0,21	0,21
60	0,19	0,20	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,19	0,20	0,20	0,20
90	0,20	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,21	0,20	0,19	0,19	0,19	0,20
120	0,20	0,20	0,20	0,21	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19	0,18	0,18	0,19
	T80-45A				T80-55A				T80-65A			
	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04	A01	A02	A03	A04
10	0,19	0,19	0,18	0,20	0,21	0,21	0,20	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21
30	0,20	0,19	0,21	0,19	0,22	0,23	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22	0,21
60	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22
90	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,23	0,21	0,22	0,23	0,21	0,20	0,20
120	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21