



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

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO
MÉTODO DE MISTURA NAS PROPRIEDADES
DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO
GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO**

JOÃO RAFAEL SEVERO NOGUEIRA

São Leopoldo, junho de 2015.

JOÃO RAFAEL SEVERO NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE MISTURA
NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADO GRAÚDO 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: Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski
Co-Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

Banca examinadora: Prof. Dr. Alexandre S. de Vargas
Prof. Dr. Claudio S. Kazmierczak

São Leopoldo, Junho de 2015.

Ficha catalográfica a ser elaborada após a conclusão das correções finais, por uma bibliotecária devidamente cadastrada no Conselho Regional de Biblioteconomia.

Catálogo na Publicação:
Bibliotecária xxxxxxxxx - CRB XX/XXX


JOÃO RAFAEL SEVERO NOGUEIRA

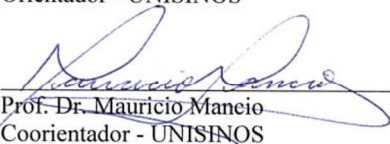
**“AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE MISTURA
NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO”**

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 19 de junho de 2015


Prof.ª Dr.ª Marlova Piva Kulakowski
Orientador - UNISINOS


Prof.ª Dr.ª Luciana Paulo Gomes
Coordenadora do PPGEC - UNISINOS


Prof. Dr. Mauricio Mancio
Coorientador - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Alexandre Silva de Vargas – FEEVALE


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak -UNISINOS

“Nenhuma engenharia constrói um caráter.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado esta oportunidade e ter colocado junto a mim todas estas pessoas, que de alguma forma, fazem parte da minha vida.

À orientadora Professora Marlova Kulakowski, “mãe” que tenho carinho especial. Pela confiança em mim depositada e pelo respaldo durante todo o curso de mestrado, por todas as críticas e sugestões, da concepção até a conclusão desta pesquisa.

Ao co-orientador Professor Mauricio Mancio, pela confiança e pelo respaldo durante todo o curso de mestrado.

Ao irmão que a vida me deu, Lucas Sebastiany, pela irmandade, apoio e preocupação de sempre.

À minha namorada, Marília Schmitz, pelo apoio, preocupação e amor de sempre.

À coordenadora do PPGEC, Professora Luciana Gomes, pela compreensão e confiança em mim depositada.

Aos professores: Andrea Kern, Carlos Alberto Moraes, Claudio Kazmierczak, Feliciane Brehm e Marco González, pela amizade e por todo o conhecimento repassado.

Aos colegas do PPGEC, que juntos, caminhamos em busca deste sonho.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos: Maurício Schafer, Rodrigo Périco, Fellipe Tortelli e Ingrid Schorn, por todas as experiências vividas durante a realização dos ensaios e, principalmente, pela amizade fortalecida.

Aos bolsistas (Guilherme, Douglas e “Janas”), pelo auxílio na realização dos ensaios.

Ao órgão de fomento à pesquisa, CAPES/PROSUP, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos grandes amigos Jeferson Oliveira e Rodrigo Einsfeldt, pela compreensão e ajuda prestada no decorrer desta caminhada.

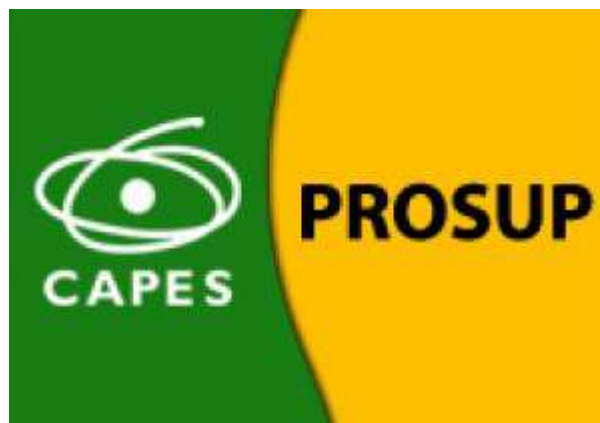
À família “Urbanos”, por terem feito bonito na minha ausência.

À “Dona Cleo” pelas palavras de apoio, orações e conselhos.

Aos meus pais, Joel e Claudete, irmãos Rogério e Rochiele e toda família.

Enfim, a todos que, à sua maneira, contribuíram para a realização desta grande conquista:
Muito Obrigado!

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	24
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	24
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	24
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	AGREGADOS NATURAIS.....	27
2.2	AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO.....	28
2.2.1	<i>Geração e origem do resíduo – agregado reciclado</i>	30
2.2.2	<i>Beneficiamento – agregado reciclado</i>	31
2.3	CARACTERIZAÇÃO DO AGRC.....	33
2.3.1	<i>Argamassa aderida ao AGCR</i>	33
2.3.2	<i>Zona de transição</i>	33
2.3.3	<i>Absorção de água</i>	34
2.3.4	<i>Resistência mecânica do AGCR</i>	37
2.4	PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO E SUA INFLUÊNCIA NO CONCRETO ...	40
2.4.1	<i>Estado fresco</i>	40
2.4.2	<i>Estado endurecido</i>	43
2.5	MÉTODOS PARA DIMINUIR OS EFEITOS DA ABSORÇÃO DO AGRC.....	46
2.5.1	<i>Pré-molhagem</i>	46
2.5.2	<i>Adição suplementar de água a água de amassamento da mistura</i>	47
2.5.3	<i>Impregnação com resinas</i>	48
2.5.4	<i>Carbonatação do concreto</i>	48
2.6	DOSAGEM E PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGRC.....	50
2.7	RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS	53
2.7.1	<i>Resistividade Elétrica no Estado Fresco</i>	54
2.7.2	<i>Resistividade Elétrica no Estado Endurecido</i>	55
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
3.1	FATORES DE CONTROLE E VARIÁVEIS DE RESPOSTA.....	59
3.1.1	<i>Fatores de controle</i>	60
3.1.2	<i>Variáveis de resposta</i>	60
3.1.3	<i>Tratamento dos dados e análise estatística</i>	61
3.2	MATERIAIS.....	61
3.2.1	<i>Cimento</i>	61
3.2.2	<i>Aditivo</i>	62
3.2.3	<i>Agregado graúdo natural (AGN)</i>	62
3.2.4	<i>Agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)</i>	62
3.2.5	<i>Agregado miúdo</i>	63
3.2.6	<i>Água</i>	64
3.3	DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	64
3.3.1	<i>Traços unitários e consumos de materiais</i>	64
3.3.2	<i>Ordem de mistura dos materiais</i>	66
3.4	MÉTODOS DE ENSAIO – ESTADO FRESCO DO CONCRETO	66
3.4.1	<i>Resistividade Elétrica</i>	67
3.4.2	<i>Abatimento ao longo do tempo (Slump Test)</i>	69
3.5	MÉTODOS DE ENSAIO – ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO.....	70
3.5.1	<i>Resistência à compressão axial</i>	70
3.5.2	<i>Resistência à tração na compressão diametral</i>	70
3.5.3	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	70
3.5.4	<i>Resistividade elétrica no estado endurecido</i>	71
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
4.1	RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DO CONCRETO.....	73

4.1.1	<i>Abatimento ao longo do tempo</i>	73
4.1.2	<i>Resistividade elétrica</i>	77
4.2	RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO	82
4.2.1	<i>Resistência à compressão</i>	82
4.2.2	<i>Resistência à tração</i>	87
4.2.3	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	90
4.2.4	<i>Resistividade elétrica do concreto endurecido</i>	92
4.3	RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO 95	
4.3.1	<i>Resistência à compressão x Resistência à tração</i>	95
4.3.2	<i>Resistência à compressão x Absorção de água</i>	97
4.3.3	<i>Resistência à compressão x Resistividade Elétrica</i>	98
5	CONCLUSÃO	103
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	APÊNDICES	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química e física do cimento Portland CP II F-32.....	61
Tabela 2– Caracterização do aditivo superplastificante.	62
Tabela 3– Caracterização granulométrica do AGN utilizado.....	62
Tabela 4– Caracterização granulométrica do AGRC utilizado.	63
Tabela 5– Caracterização granulométrica do agregado miúdo utilizado.	64
Tabela 6– Consumo de materiais utilizados em cada traço de concreto produzido.....	66
Tabela 7 – ANOVA para abatimento inicial.	75
Tabela 8 – ANOVA para resistividade elétrica no estado fresco.....	79
Tabela 9 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão.....	85
Tabela 10 – ANOVA dos resultados de resistência à tração.....	90
Tabela 11 – Resultados de absorção de água por capilaridade.....	90
Tabela 12 – ANOVA dos resultados de absorção de água.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem ilustrativa de um Agregado de Resíduo de Concreto (ARC)	30
Figura 2 - Britador de mandíbulas utilizado para fragmentar o material	32
Figura 3 - Interfaces do agregado reciclado de concreto.....	34
Figura 4 - Representação esquemática das condições de umidade do agregado.....	35
Figura 5 - Representação esquemática do agregado não saturado imerso em água e detalhe de sua superfície na mistura do concreto.....	36
Figura 6 - Representação esquemática do agregado saturado imerso em água e detalhe de sua superfície na mistura do concreto	37
Figura 7 – Evolução da absorção de água crítica para diferentes agregados em comparação ao natural.....	49
Figura 8 - Curva de absorção de ARC com dimensão de 25 mm não carbonatado e carbonatado.....	50
Figura 9 - Curva de absorção de ARC com dimensão de 12,5mm não carbonatado e carbonatado.....	50
Figura 10 - Sonda de resistividade elétrica para medida da relação água/cimento de concretos no estado fresco	55
Figura 11 – Esquema elétrico para medida de resistividade.	56
Figura 12 - Fluxograma de ensaios desenvolvidos no programa experimental.	59
Figura 13– Absorção por imersão dos AGN e AGCR ao longo do tempo.	63
Figura 14 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	64
Figura 15 – Corte esquemático da sonda utilizada no ensaio de resistividade elétrica.	67
Figura 16 – Sonda produzida para os ensaios de resistividade elétrica.....	68
Figura 17 – Realização do ensaio: medição da resistividade elétrica no estado fresco.....	68
Figura 18 – Componentes do sistema de bancada, utilizado para realização dos ensaios.	69
Figura 19 – Abatimento ao longo do tempo (<i>Slump Test</i>).....	69
Figura 20 - Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade.	71
Figura 21 - Esquema do método de ensaio de resistividade do concreto no estado endurecido.	71
Figura 22 – Ensaio de resistividade elétrica no estado endurecido	72
Figura 23- Abatimento ao longo do tempo dos concretos com relação água/cimento igual a 0,42.	73
Figura 24- Abatimento ao longo do tempo dos concretos com relação água/cimento igual a 0,53.	73
Figura 25- Abatimento ao longo do tempo dos concretos com relação água/cimento igual a 0,64.	74
Figura 26 – Médias do efeito do fator a/c sobre o abatimento inicial.	75
Figura 27 - Médias do efeito do fator mistura sobre o abatimento inicial	76
Figura 28 – Efeito associado da relação a/c e da mistura no abatimento inicial.	76
Figura 29- Resistividade elétrica dos concretos com relação água/cimento igual a 0,42.	77
Figura 30- Resistividade elétrica dos concretos com relação a/c igual a 0,53.	78
Figura 31- Resistividade elétrica dos concretos com relação água/cimento igual a 0,64.	79
Figura 32 – Médias do efeito da ‘mistura’ sobre a resistividade elétrica no estado fresco.	80
Figura 33 – Médias do efeito da relação a/c sobre a resistividade elétrica.	81
Figura 34 – Médias do efeito da interação entre relação a/c e mistura na resistividade elétrica do concreto no estado fresco.	81
Figura 35- Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias.....	82
Figura 36- Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.....	83
Figura 37- Resistência à compressão dos concretos aos 63 dias.....	83

Figura 38 – Médias do efeito da relação água cimento sobre a resistência à compressão.....	86
Figura 39 – Médias do efeito da idade sobre a resistência à compressão.	86
Figura 40 – Médias do efeito da mistura sobre a resistência à compressão.....	86
Figura 41 – Médias do efeito da interação entre relação a/c e mistura sobre a resistência à compressão.	87
Figura 42- Resistência à tração dos concretos aos 7 dias.	88
Figura 43- Resistência à tração dos concretos aos 28 dias.	88
Figura 44- Resistência à tração dos concretos aos 63 dias.	89
Figura 45- Absorção de água dos concretos com relação água/cimento igual a 0,42.....	91
Figura 46- Absorção de água dos concretos com relação água/cimento igual a 0,53.....	91
Figura 47- Absorção de água dos concretos com relação água/cimento igual a 0,64.....	92
Figura 48- Resistividade elétrica dos concretos à 1 dia, com umidade a 100%.	93
Figura 49- Resistividade elétrica dos concretos aos 7 dias, com umidade a 100%.	93
Figura 50- Resistividade elétrica dos concretos aos 28 dias, com umidade a 100%.	93
Figura 51- Resistividade elétrica dos concretos aos 63 dias, com umidade a 100%.	93
Figura 52 - Resistividade elétrica dos concretos à 1 dia, com umidade a 70%.	94
Figura 53- Resistividade elétrica dos concretos aos 7 dias, com umidade a 70%.	94
Figura 54 - Resistividade elétrica dos concretos aos 28 dias, com umidade a 70%	94
Figura 55- Resistividade elétrica dos concretos aos 63 dias, com umidade a 70%.	94
Figura 56- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração, aos 7 dias.	96
Figura 57- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração, aos 28 dias.	96
Figura 58- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração, aos 63 dias.	97
Figura 59- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e absorção de água, aos 28 dias.	97
Figura 60- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 100%, aos 7 dias.	98
Figura 61- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 100%, aos 28 dias.	99
Figura 62- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 100%, aos 63 dias.	99
Figura 63- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 70%, aos 7 dias.	100
Figura 64- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 70%, aos 28 dias.	101
Figura 65- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 70%, aos 63 dias.	101

RESUMO

NOGUEIRA, J.R.S. Avaliação da influência do método de mistura nas propriedades de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto. São Leopoldo, ano. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. Ano.

A reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) classe A é incentivada e a viabilidade do seu emprego como agregado alternativo em concretos e argamassas já vem sendo estudada por diversos autores. A fração de concreto do RCD é indicada como a mais viável para o emprego como agregado na produção de concretos, pois apresentam propriedades mecânicas mais elevadas que outras frações do RCD classe A, e características próximas à matriz na qual são inseridos. Porém, apresentam-se mais porosos e possuem propriedades mecânicas inferiores aos agregados convencionais. A porosidade do agregado de concreto reciclado influencia na sua absorção de água, o que geralmente altera a demanda de água da nova mistura, podendo desta forma, trazer prejuízos ao novo concreto, principalmente no estado fresco e na durabilidade. Muitas pesquisas têm incorporado o Agregado Graúdo Reciclado de Concreto (AGRC) ao concreto no início da mistura, o que faz com que o mesmo tenha maior tempo para absorver a água de amassamento durante o preparo e manipulação, trazendo prejuízos a consistência do concreto. Um dos métodos para mitigar este efeito é o seu emprego saturado ou parcialmente saturado com água, o que introduz uma etapa prévia de preparação do AGRC na produção do concreto. A presente pesquisa tem por objetivo comparar dois diferentes métodos de incorporação do AGRC na mistura de concreto, com o intuito de mitigar os efeitos da sua maior absorção de água. Alternativamente ao método tradicional, foi avaliada neste estudo a incorporação do AGRC seco ao final da mistura. Para avaliar estes concretos, foram realizados os ensaios de abatimento de tronco de cone (*slump*), resistividade elétrica no estado fresco, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e resistividade elétrica no estado endurecido. A consistência do concreto sofre menos influência do AGRC quando ele é incorporado no final da mistura. No entanto, a resistividade no estado fresco não aponta diferenças significativas entre os dois métodos. Já no estado endurecido, percebe-se que, por absorver água de amassamento, e com isso reduzir a relação a/c efetiva, a incorporação do AGRC na primeira etapa da mistura traz resultados de resistência à compressão, em alguns traços, superiores ao concreto de referência.

Palavras-chave: agregado graúdo reciclado de concreto; método de mistura; resistividade elétrica; absorção de água.

ABSTRACT

NOGUEIRA, J.R.S. Evaluation of the influence of mixing method on the properties of concrete made with recycled concrete aggregate São Leopoldo, 2015. 120f. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Graduate in Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

The recycled concrete aggregate (RCA) have been widely studied and the results have been showed that its employ in partial replacement can be feasible. This recycled aggregate is more viable to use in concrete than those recycled from mixed construction and demolition waste. However, the RCA has a higher porosity than natural aggregate and sometimes their mechanical resistance is less than the new concrete resistance. The higher porosity leads the RCA to absorb the mixing water of new concrete and to reduce the concrete slump. To avoid these problems the consequences are an increase on the water demand and on the cement consumption, in order to maintain the water/binder ratio. There are some ways to mitigate these problems like as to add water to the mixture, use the RCA pre saturated, cover the RCA surface with resins, use carbonated RCA. Some researchers proposed different concrete mix methods to produce concrete with RCA with some good results. The aim of this research is to evaluate two methods of mixing concrete with recycled concrete aggregate and their influence in fresh and hardened concrete properties. Usually the RCA is added to the mixture in the same time as the natural aggregate. This practice put the RCA in contact with the fresh mixing for a large period time and lead to absorb a higher amount of water. In consequence, there is a great loss in concrete slump, but this can bring an increment in the concrete resistance. In alternative, this work proposed the adding of RCA in the end of the mixture, evaluating the influence of the two methods the properties of fresh concrete and hardened concrete. The loss in concrete slump is lower when the RCA is introduced at the end of the mixture. However there is no significant difference in the electrical resistivity of fresh concrete. For hardened concrete, the best results were from concretes where the RCA was added at the end of the mixture.

Key-words: Recycled concrete coarse aggregate; mixing methods; resistivity; fresh concrete; durability.

1 INTRODUÇÃO

O tema a ser desenvolvido nesta proposta surge a partir da observação da situação atual, na qual são geradas diariamente grandes quantidades de resíduos pela construção civil, sendo que a sua destinação incerta pode acarretar sérios problemas ambientais. Nesta linha, surgem preocupações e propostas de estudo dotadas alternativas sustentáveis, mediante a reutilização desses resíduos na própria construção civil. As pesquisas envolvendo o tema buscam contribuir para a preservação ambiental e auxiliam no surgimento de novas técnicas, materiais e reuso destes materiais, de forma a aplicá-los como matéria-prima. Assim, viabiliza-se a promoção da redução dos impactos causados à natureza.

Conforme dados apresentados pelo CBIC (2014), a produção do setor da construção civil, compõe-se de diversos subsetores: materiais de construção, bens de capital para construção, edificações, construção pesada e serviços diversos, que incluem atividades imobiliárias, serviços técnicos de construção e atividades de manutenção de imóveis. Com a finalidade de atender todos estes subsetores, a indústria da construção civil requer certa quantidade de matérias-primas não renováveis, como os recursos minerais, explorando jazidas para a obtenção de materiais que subsidiam o desenvolvimento humano.

De acordo com Pinto (1999), a indústria da construção civil exerce papel relevante na degradação ambiental, pois contribui para o esgotamento de recursos naturais, poluição do ar, do solo e da água, consome notável quantidade de energia, e é também responsável pela produção de resíduos. Mehta e Monteiro (2008), ainda colocam que o setor é responsável pela utilização em torno de 50% dos recursos naturais, 40% da energia, 16% da água do mundo, e são responsáveis por mais de um quarto das emissões dos gases causadores do efeito estufa, especialmente o CO₂.

Em 2010, a geração de resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil, de acordo com a Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (2011), correspondia, em média, a 60% dos resíduos sólidos urbanos. Em conformidade com dados apresentados no CBIC (2014), a taxa média de crescimento das empresas formais da construção civil foi de 11,2% ao ano, o que é mais do que o dobro da taxa do setor (5,1% ao ano), além da maior oferta de crédito imobiliário e programas de investimentos, como o Programa de Aceleração do Crescimento - PAC e o Programa Minha Casa Minha Vida. Consequentemente, acarretando um aumento dos resíduos gerados por este setor, o que fez surgir preocupações quanto à sua destinação.

Este panorama mostra a imprescindibilidade de um uso mais racional dos recursos, tais como energia e matérias-primas, assim como de implante de uma adequada política de gestão de resíduos.

A reciclagem de resíduos pode gerar diversos benefícios para a sociedade, como a redução dos custos de produção de materiais e componentes e a redução do volume de extração de matérias-primas, preservando recursos naturais.

Frise-se que a reciclagem dos RCD classe A (CONAMA, 2002) é incentivada e sua viabilidade para emprego em concretos e argamassas já vem sendo estudada por diversos autores, entre eles Leite (2001), que estudou agregados de RCD misto. No entanto, a elevada variabilidade do agregado reciclado de RCD misto restringe o seu uso em concretos e argamassas por influenciar diretamente em várias propriedades de forma não satisfatória. Dentre os diversos componentes que fazem parte do RCD, a fração de concreto é representativa e a reciclagem isolada desta fração pode diminuir esta variabilidade dos agregados reciclados de RCD. Assim, uma alternativa possível é a incorporação em concretos do agregado reciclado de concreto (WERLE, 2011).

A composição dos RCD é feita por múltiplos materiais. Como exemplo, a cerâmica, a argamassa, o asfalto, vidros, o concreto, blocos e tijolos, o papel, pedra britada, madeira, tintas, metais, plásticos, o gesso e outros materiais em segundo plano (JOHN; ÂNGULO, 2003; GRIGOLI, 2000; OLIVEIRA; ASSIS, 1999). Dos materiais citados, o gesso, os papéis, os plásticos e a madeira são considerados impurezas que, adicionados em maior quantidade, comprometem de forma negativa a resistência do concreto reciclado (CHEN et al., 2003; HENDRICKS e XING, 2004).

O agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) pode ser mais viável para o emprego como agregado na produção de concretos, por tratar-se de um material menos variável do que o agregado reciclado de RCD misto, com propriedades mecânicas consideravelmente adequadas e com propriedades similares à matriz na qual é inserido. Porém, apresenta-se mais poroso e com propriedades mecânicas inferiores aos dos agregados convencionais. De acordo com Troian (2010), a porosidade do agregado de concreto reciclado influencia na sua absorção de água, o que pode alterar a demanda de água da mistura do concreto, podendo desta forma, trazer prejuízos ao novo concreto, principalmente no estado fresco e durabilidade.

1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização de agregados reciclados vem tomando força e tornando-se uma prática importante, desta forma, trazendo benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade em geral. Os resíduos de concretos podem ser originados em empresas de serviços de concretagem, podem ser provenientes de empresas pré-fabricadas e pré-moldadas ou ser encontrados na construção e demolição de edificações. Qualquer que seja sua proveniência é necessário um levantamento e análise, caracterizando estes materiais para sua futura aplicação.

De acordo com Buttler e Corrêa (2003), os resíduos de concreto gerados em fábricas de pré-moldados apresentam um excelente potencial para serem reciclados, pois há uma homogeneidade e uma presença insignificante de contaminantes se comparados aos demais resíduos da construção e demolição.

Atualmente, vem sendo desenvolvidos trabalhos e pesquisas relacionados ao uso de agregado reciclado de concreto em substituição ao agregado natural na produção de argamassas e concretos. Desta forma, comprovando sua viabilidade e conseqüentemente, proporcionando um destino para estes resíduos. Contudo, há lacunas a serem preenchidas na forma como este material deve ser aplicado às misturas. Mesmo que o agregado reciclado de concreto possua menor variabilidade e menor incidência de contaminação, estes apresentam maior porosidade e menor massa específica que os agregados convencionais. Com base nisto, alguns autores (TROIAN, 2010; WERLE, 2010; BRITTO, 2010; KOU E POON 2012) afirmam que os concretos produzidos com AGRC apresentam uma menor trabalhabilidade quando comparados aos concretos com agregados naturais, devido à maior capacidade de absorção de água destes.

Portanto, o processo de dosagem e mistura do concreto, conforme Boggio (2000), deve ser abordado no sentido mais amplo quando se trata do desenvolvimento da tecnologia do concreto, considerando-se um vasto campo de trabalho que envolve o estudo e a seleção dos materiais e o conhecimento das etapas de produção e controle com as quais interage de forma intensa. A atividade de dosagem possui fundamental importância, pois não somente estabelece as proporções dos materiais básicos do concreto como também determina as características necessárias para que seja alcançado um desempenho satisfatório do produto final em termos de qualidade e de economia. Em busca de um resultado onde objetiva-se atender os requisitos estabelecidos para a produção do concreto, este não pode ser dissociada

da qualidade dos seus componentes constituintes (cimento, agregados, água e opcionalmente adições e aditivos).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o foco principal da preparação do concreto pode ser resumido basicamente, como a escolha dos materiais que melhor se enquadram entre os disponíveis e a determinação da combinação mais econômica, de forma que produza um concreto que atenda características de desempenho mínimo estabelecidas. A preparação do concreto é influenciada por uma série de fatores, como a sequência dos materiais, o tempo de mistura e o tipo de misturador. Uma mistura eficiente influencia no comportamento e nas propriedades do concreto, uma vez que distribuem melhor as partículas de cimento, água e agregado (OYANADEL, 2009).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

De maneira geral, esta pesquisa objetiva analisar a influência do método de mistura de concretos com Agregado Graúdo de Concreto Reciclado (AGCR) nas propriedades do estado fresco e do estado endurecido.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a influência do método de incorporação do AGCR no abatimento e na resistividade elétrica no estado fresco;
- Verificar a influência da ordem de incorporação do AGCR na produção de concretos, analisando as propriedades de resistividade elétrica no estado endurecido, resistência à compressão axial, tração na compressão diametral e absorção de água por capilaridade;
- Analisar a relação entre as diversas variáveis de reposta no estado fresco e endurecido dos concretos produzidos.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa divide-se em cinco capítulos, conforme descrito na sequência.

O primeiro capítulo trata de uma breve introdução à problemática envolvida neste trabalho, apresentando as justificativas para a escolha do tema abordado, estabelecendo, assim, os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O capítulo seguinte traz uma contextualização através de revisão bibliográfica dos assuntos de maior relevância à pesquisa: agregado natural, agregado graúdo reciclado de concreto, características e propriedades deste material, dosagem e inserção do AGCR na produção e novos concretos.

No capítulo três são descritas as variáveis do programa experimental, a caracterização dos materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento das análises previstas.

O quarto capítulo consiste na apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos no programa experimental.

Finalmente, o capítulo cinco apresenta as considerações finais, baseadas nos resultados alcançados nesta pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Dadas as especificidades desta pesquisa, principalmente, no que tange ao programa experimental desenvolvido, faz-se necessário apresentar algumas delimitações. 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.

O teor de agregado graúdo reciclado de concreto foi fixado em 50% em substituição ao agregado graúdo natural, embasado nos trabalhos que vem sendo desenvolvidos no GMat/PPGEC/Unisinos.

A adoção dos níveis de relação água/cimento iguais a 0,42; 0,53 e 0,64, reproduz trabalhos já realizados, possibilitando comparações com trabalhos anteriores, bem como enquadra-se no intervalo estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014 para estruturas de concreto armado, com nível máximo menor do que o limite de 0,65. A opção por diferentes relações a/c busca também elaborar concretos com diferentes resistências, e assim estudar o comportamento do AGRC em cada classe de resistência do concreto.

Foram propostos dois diferentes procedimentos para incorporação do AGRC nas misturas de concreto. O primeiro deles é aquele em que o AGRC é introduzido na mistura no início, junto com o agregado natural. A segunda proposta adota a inserção do AGRC ao final da mistura, de forma simplificada.

As condições de contorno do programa experimental foram assim estabelecidas de forma a garantir qualidade e racionalização dos recursos e cronograma.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica serão abordados temas relacionados à pesquisa, como detalhes sobre o concreto e seus materiais constituintes, além de explicar sobre a influência da ordem de incorporação do AGCR, dando ênfase às propriedades relacionadas ao estado fresco e endurecido do concreto.

O concreto é um material que possui duas condições distintas: estado fresco e estado endurecido. O primeiro obedece a um período de tempo de 1 a 5 horas, em geral, no qual o material é misturado, transportado, lançado e adensado. A segunda etapa relaciona-se ao início da hidratação, seguindo por toda a vida da estrutura do concreto.

Segundo Poon, Shui e Lan (2004), o concreto possui uma estrutura heterogênea e complexa, suas fases interagem e as propriedades de cada uma influenciam as outras. Então, para que se tenha um controle ou conhecimento destas propriedades, é necessário conhecer seus principais constituintes, características e a relação existente entre eles. Com base nestes dados, esta pesquisa irá abordar assuntos pertinentes ao assunto, levando em consideração o concreto no estado fresco e também no estado endurecido.

Portanto, é preciso realizar estudos mais detalhados sobre a associação do uso de agregados reciclado, com o intuito de aprofundar conhecimentos das propriedades desses materiais, pois quando adicionados ou substituídos ao concreto, alteram suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Visto que a relação de durabilidade e vida útil desses novos materiais está diretamente ligada às suas propriedades, torna-se indispensável uma avaliação mais profunda sobre o comportamento do concreto frente aos agentes agressivos que induzem e provocam a deterioração do concreto.

2.1 AGREGADOS NATURAIS

De acordo com Sbrighi Neto (2005), os agregados eram considerados como um material inerte, apenas com a função de ocupar espaço no concreto, barateando seu custo. Porém esta percepção acabou mudando com o passar dos anos em função da necessidade de se conhecer o verdadeiro papel dos agregados no desempenho dos concretos, demonstrando que muitas propriedades dos concretos estão relacionadas com os agregados utilizados.

Com relação aos agregados, os mesmos dividem-se entre agregados graúdos e miúdos, sendo que esta divisão ocorre através do tamanho das partículas. A NBR 7211 (ABNT, 2009) define agregado miúdo como o material granular que passa pela peneira de

abertura de 4,75 mm e retido na peneira de malha 150 μm , enquanto o agregado graúdo corresponde aos grãos passantes na peneira de malha de 75 mm e retidos na de malha com abertura de 4,75. Dentre as características dos agregados algumas propriedades são de grande importância, como sua distribuição granulométrica, massa específica e massa específica aparente, absorção e umidade superficial, resistência mecânica, forma e textura superficial dos grãos, além de apresentarem isenção de certas substâncias nocivas, como impureza de origem orgânica, torrões de argila e materiais pulverulentos.

Ao avaliar as propriedades de um agregado, Mehta e Monteiro (2008) expõem que a melhor forma de divisão das propriedades é com relação às características dependentes da porosidade (massa específica, absorção de água, resistência, dureza e módulo de elasticidade), características dependentes das condições de exposição prévia e de fabricação (tamanho, forma e textura) e características dependentes da composição química e mineralógica (resistência, dureza, módulo de elasticidade e presença de substâncias deletérias).

Os agregados graúdos, comumente utilizados no Rio Grande do Sul, são provenientes de rochas ígneas, em especial o basalto e o granito, sendo classificados quanto à sua origem como agregados britados, em função de serem submetidos a um processo de cominuição, apresentando grande densidade, na ordem de 2,80 g/cm^3 e absorção entre 0,1% a 0,6%. Os agregados miúdos por sua vez, correspondem em grande maioria às areias de leito de rio (quartzo, SiO_2), sendo obtidos através da dragagem do leito de rios e classificados quanto a sua origem como agregados naturais (proveniente de rochas intemperizadas) (SBRIGHI NETO, 2005).

2.2 AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Em conformidade com a NBR 15116 (ABNT, 2004), agregado reciclado pode ser definido 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.”

A mesma norma dá conta de definir também o agregado de resíduo de concreto (ARC), conceituando este agregado como aquele alcançado do beneficiamento de resíduo próprio à classe A, combinado na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Com o intuito de fomentar a preservação de fontes naturais e reduzir o número de resíduos gerados pela construção civil, a inserção de agregados provenientes destes materiais na produção de novos concretos, em substituição ao agregado natural, resultando desta forma em um coproduto (CAVALHEIRO, 2011).

A maneira como o material é fragmentado desempenha grande influência no que diz respeito às propriedades do agregado reciclado de concreto, especialmente a granulometria e forma e textura dos grãos que afetam expressivamente a massa específica e a resistência à compressão do concreto fabricado com agregado reciclado.

Padovan (2013), afirma que as características dos agregados reciclados têm significado importante na produção de novos concretos, desta forma, sendo necessário avaliar e considerar fatores como composição granulométrica, forma e textura, porosidade e absorção de água, entre outros condicionantes deste material, pois quando estes inseridos na mistura, podem influenciar no resultado final do concreto, tanto no estado fresco ou endurecido. Portanto, a autora descreve que o AGCR deve ser analisado, caracterizando-o, levando em consideração a maior heterogeneidade, menor resistência em relação à matriz onde será inserido e maior porosidade do agregado reciclado de concreto em relação ao agregado natural.

Benetti (2012) afirma que as propriedades do AGRC são decorrentes das características do concreto que originou o agregado reciclado e também do processo de beneficiamento adotado. A autora ainda afirma que o beneficiamento abrange fases como a coleta, transporte, classificação dos resíduos, britagem e peneiramento.

As principais diferenças entre o agregado natural e reciclado dizem respeito à porosidade e ao processo de cominuição. Os agregados reciclados apresentam uma grande quantidade de argamassa aderida, tornando a porosidade maior que nos agregados naturais (ETXEBERRIA et al., 2007). Esta maior porosidade produz, de acordo com Cabral (2007), que analisou concretos produzidos com RCD, um concreto com uma microestrutura mais porosa, pois além do agregado de RCD ser mais poroso que o agregado natural, a interação entre pasta e agregado reciclado tende a gerar um concreto mais poroso. A Figura 1 apresenta uma imagem demonstrativa do AGRC.

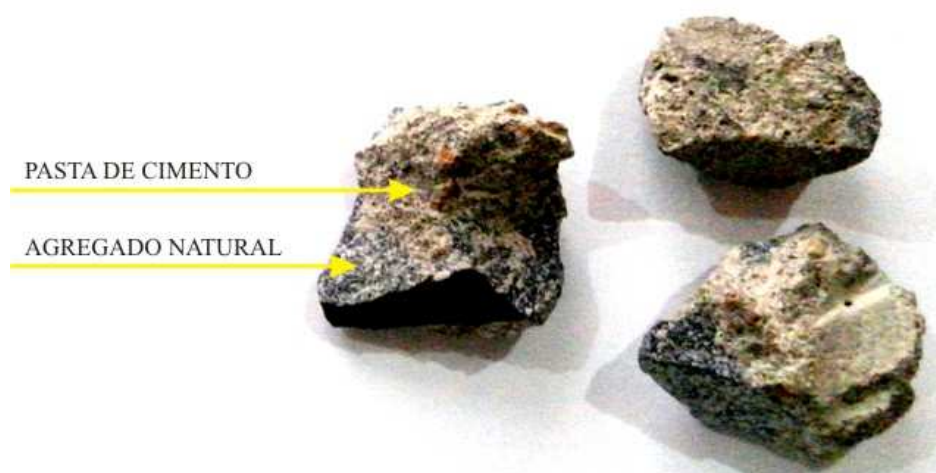


Figura 1 - Imagem ilustrativa de um Agregado de Resíduo de Concreto (ARC)

Fonte: Autor (2015)

2.2.1 Geração e origem do resíduo – agregado reciclado

De acordo com Oliveira e Assis (1999), a composição do resíduo de concreto é heterogênea devido à sua constituição surgida a partir de material proveniente de diferentes fontes. Podem-se citar como exemplo, concretos dosados, produzidos e aproveitados com controle tecnológico, assim como concretos que fabricados sem controle de qualidade, podendo este último chegar a 60%. A construção civil pratica diferentes atividades dentro de um canteiro de obras. Desta forma, o resíduo originado destas atividades também pode ser combinado por uma ampla quantidade de materiais. Todos esses elementos conferem ao resíduo uma heterogeneidade elevada, e a segregação total, na opinião de Leite (2001) seria praticamente impraticável. A quantidade, composição e característica dos resíduos podem sofrer interferência diante de alguns aspectos. Desta forma, as peculiaridades dos resíduos são dependentes e atreladas aos parâmetros característicos da fonte geradora, bem como à mudança de parâmetros relacionados no transcorrer do tempo.

Levy (2001) explana que os agregados reciclados são oriundos de fragmentos de materiais minerais britados sucedidos de estruturas de concreto demolidas, assim como concretos frescos endurecidos e rejeitados. Já Buttler (2003) explica que os resíduos de concreto são compostos de rejeitos de demolição de estruturas de concreto, detritos de indústrias de concreto, resíduos de manufaturas de elementos pré-moldados e de pavimentos de concretos, bem como dos resíduos de concreto de estabelecimentos de pesquisa que executam estudos com esse material. Os atributos destes agregados recicláveis são muito específicos, estando dependentes dos materiais destinados às centrais de reciclagem e da forma como o processo de beneficiamento para produção do agregado foi realizada.

Porém, Buttler e Corrêa (2006), citam que os concretos produzidos em fábricas de pré-moldados, demonstram maior potencial na produção de novos concretos, por apresentarem maior homogeneidade e pequena quantidade de contaminantes, quando comparados aos resíduos citados anteriormente.

2.2.2 Beneficiamento – agregado reciclado

O processo de britagem (cominuição) do AGRC é diretamente influenciado pelo tipo de britador utilizado. Santos (2008) afirma que são três os principais tipos de britadores utilizados: britador de impacto, de mandíbula e de martelo. Com relação aos britadores de impacto, o autor expõe que estes britadores apresentam alta redução das peças, gerando grãos de forma cúbica e boa quantidade de finos. Os britadores de mandíbula, não reduzem muito as dimensões do material, gerando agregados graúdos e de formato lamelar. Já os britadores de martelo se caracterizam como britadores secundários que produzem uma grande quantidade de material miúdo, sendo utilizados, de acordo com Santos (2008), normalmente com os britadores de mandíbula.

Conforme Buttler (2003) há distintas técnicas que podem ser empregadas na reciclagem dos resíduos de concreto. Essencialmente, os dois tipos de resíduos originados nas indústrias de concreto pré-misturado e fábricas de pré-moldados são os resíduos de concreto no estado fresco e resíduos de concreto no estado endurecido.

Um dos artifícios aproveitados para a reciclagem do concreto fresco consiste no isolamento dos agregados da água de lavagem, que são fragmentos de cimento mais finos em suspensão. Na técnica mecânica de separação, o método de reciclagem é simplório. Os resíduos de concreto fresco são colocados num funil alimentador, que transporta esses resíduos para a primeira divisão do aparelho, aonde permanentemente é depositada água com o intuito de dar auxílio na decantação dos agregados, com o que o aglomerante fique em suspensão (REZENDE et al., 1996). Na visão de Buttler (2003), o uso do equipamento reciclador do concreto fresco gera benefícios técnico-econômicos do reaproveitamento dos agregados no processo de lavagem, falta de gastos com a deposição de detritos sólidos e ainda suscita beneficiamentos ambientais provenientes da reciclagem. No entender do mesmo autor, para o tratamento do concreto fresco são usadas caixas de sedimentação do material. É um método de baixo investimento, e, por este motivo, esse procedimento é, atualmente, a técnica mais aplicada, consistindo em uma caixa de sedimentação de fundo inclinado, onde são distribuídos o concreto residual e os resíduos da lavagem dos veículos e do pátio central. Para

o reaproveitamento da água usada na lavagem é indispensável a efetivação de duas a quatro caixas, em linha, para a decantação do aglomerante e partículas finas em suspensão na água.

Para a cominuição dos resíduos de concreto endurecidos, torna-se necessário a utilização de equipamentos do tipo britadores de mandíbula, de impacto, giratório e de cone, britador de rolo e moinho de martelo. O britador de mandíbulas (Figura 2) despedaça o material por esmagamento, compressão (JADOVSKI, 2005). Conforme Paul et al. (2003), a quebra do material acontece pela energia de compressão do equipamento, aposta por meio do movimento periódico de ajuntamento e afastamento de uma superfície de britagem movediça contra outra fixa. Cavalheiro (2011) esclarece que o britador de impacto quebra o concreto através da colisão do material em placas fixas de impacto. Buttler (2003) e Hansen (1992) afirmam que este equipamento é mais recomendado para a obtenção de agregados com destinação para sub-bases e bases de rodovias e são menos suscetíveis a materiais incapazes de ser britados como, por exemplo, barras de aço presentes nas estruturas de concreto armado. No que diz respeito ao britador giratório e de cone, a diminuição do tamanho do concreto ocorre pelo ajuste da compressão e do atrito.

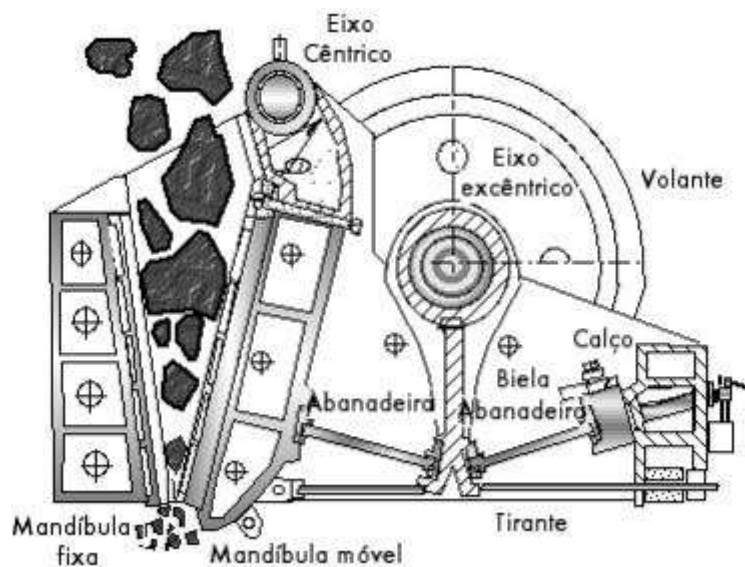


Figura 2 - Britador de mandíbulas utilizado para fragmentar o material

Fonte: Jadovsky (2005)

Os agregados alcançados com esses aparelhamentos são superiores em relação aos de mandíbula, decorrendo uma melhor proporcionalidade de calibre das partículas, melhor graduação e aumento do percentual de fíler (PAUL et al.,2003). No entender deste autor, existe também o britador de rolo que atua por compressão aplicando o princípio de fragmentação por clivagem. Este aparelho determina agregados de dimensão pequena. O

britador de martelo é utilizado em um método secundário de cominuição, eis que a abertura do equipamento para a introdução do material não suporta amplos volumes de concreto. Desta forma este britador, de regra, está conexo ao britador de mandíbulas. Ele produz uma alta taxa de material miúdo (CAVALHEIRO, 2011). Paul et al. (2003) explicita que a fragmentação do material é alcançada pelo choque dos martelos girando em elevada celeridade e pela colisão do material atirado. A apropriada eleição do tipo de britador a ser empregado aperfeiçoa os resultados e proporciona agregados com a granulometria e forma de partículas almejadas.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGRC

2.3.1 Argamassa aderida ao AGCR

A caracterização do AGCR deve levar em consideração, entre outros fatores, a grande capacidade de absorção de água, devido à alta porosidade deste material. Esta característica deve-se ao alto teor de argamassa aderido ao AGN, influenciando assim, nas propriedades físicas e mecânicas do novo concreto produzido. Desta forma, é importante estudar o nível de argamassa presente nestes materiais, tornando-se fundamental para compreender melhor a influência da absorção de água na produção de novos concretos (PADOVAN, 2013).

Pode-se concluir que esta característica se resume à argamassa originada através da mistura de cimento, água e agregados miúdos, aderida ao agregado natural graúdo. Esta argamassa é responsável pela maior porosidade apresentada por este material, pelas alterações na massa específica e na absorção de água dos agregados, além de influenciar em outros fatores. Desta forma, acarretando nas propriedades do novo concreto produzido, conseqüentemente em suas características no estado fresco e endurecido, dependendo do nível de argamassa aderida (BRITO, 2005).

2.3.2 Zona de transição

A argamassa formada por restos de cimento na zona de transição do AGRC forma um elo fraco neste material, o qual apresenta em sua composição muitos poros e fissuras, em consequência disto, acabam afetando negativamente na resistência final. São estas características que ocasionam o maior consumo de água, conduzindo uma menor quantidade de água para a hidratação na zona de transição do AGRC (TAM et al., 2005).

Ao comparar a estrutura do AGCR com o agregado natural, os autores afirmam que é muito mais complexa e enfatizam que o AGRC possui duas zonas de transição, sendo 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 apresentados na Figura 3. Estas zonas de transição executam um papel crítico, pois a ligação entre estes dois componentes determina o desempenho mecânico do concreto.

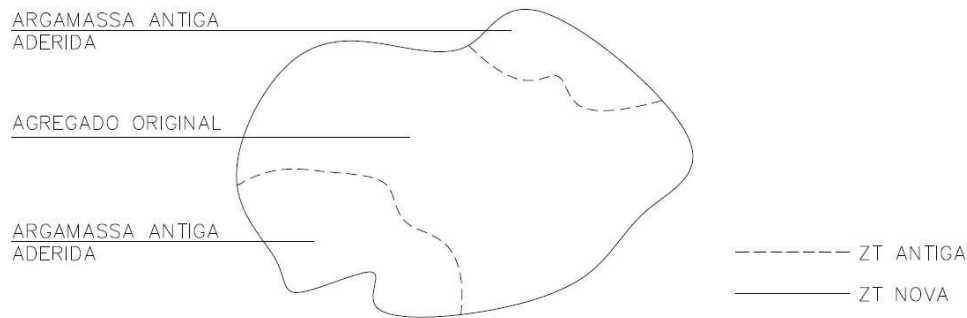


Figura 3 - Interfaces do agregado reciclado de concreto

Fonte: Adaptado de Tam et al. (2005)

De acordo com alguns autores, a água absorvida pelo agregado reciclado permanece disponível para exercer a hidratação do cimento em idades avançadas. Ou seja, o agregado reciclado promove a cura úmida interna da matriz do cimento, desta forma, melhorando a zona de transição. Porém, há pesquisas comprovando que na produção de concretos, quando ocorre a absorção pelo AGRC, isto implica na redução da quantidade de água na zona de transição, prejudicando a hidratação nessa região. (BARRA, 1996; KOHNO et al., 1999; TEGGUER, 2012).

2.3.3 Absorção de água

Padovan (2013) afirma que a taxa de absorção de água caracteristicamente baixa dos agregados naturais geralmente inferior a 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 AGRC frente ao AGN, na ordem de 4 a 6% maior afeta as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. A autora, 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, afirma que 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 nesta revisão, é importante avaliar a taxa de absorção de água do AGRC para que, a partir disto, 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. Por outro lado, ainda não há consenso sobre a quantidade de água de compensação a ser utilizada e nem sobre a forma mais adequada para realizá-la. Também é importante salientar que Leite (2001), afirma que esta quantidade maior de água que será incorporada à produção da mistura, acarretará um aumento na relação água/cimento, consequentemente, redução da resistência mecânica do concreto produzido com agregado reciclado.

Para determinar a taxa de absorção dos agregados, são colocados 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 utilizada na produção de concretos. Porém, ao utilizar os agregados reciclados, estes apresentam alta capacidade de absorção de água no tempo, como foi constatado por Tegguer (2012) e Tam et al. (2007). Desta forma, a difusão de água nos poros do agregado reciclado pode variar muito em função do meio e do tempo de contato.

Padovan (2013) constatou que 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 4 representa a absorção de água de um agregado em quatro diferentes estágios.



Figura 4 - Representação esquemática das condições de umidade do agregado

Fonte: Neville (1997) adaptado pelo autor (2015)

De acordo com estudos realizados por Poon et al. (2004), onde os autores afirmam que o emprego de agregados reciclados, ao utilizar condições extremas de umidade, ou seja,

uma condição totalmente saturada, além de provocar o aumento da trabalhabilidade do concreto produzido com este material, pode causar influência ao concreto em termos de propriedades mecânicas e de durabilidade.

A Figura 5 demonstra 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.

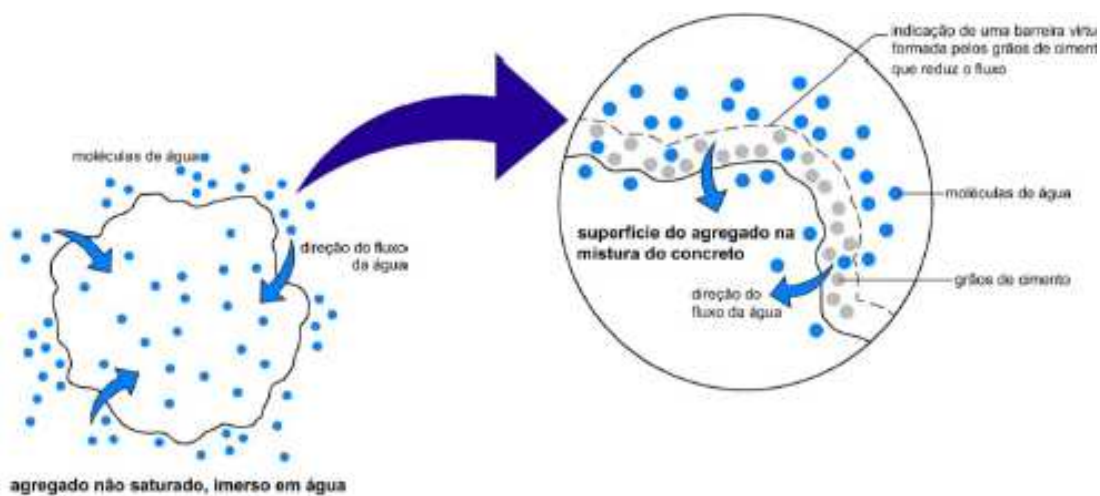


Figura 5 - Representação esquemática do agregado não saturado imerso em água e detalhe de sua superfície na mistura do concreto

Fonte: Neville (1997) adaptado por Padovan (2013)

A Figura 6 demonstra 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. Porém, 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 (PADOVAN 2013).

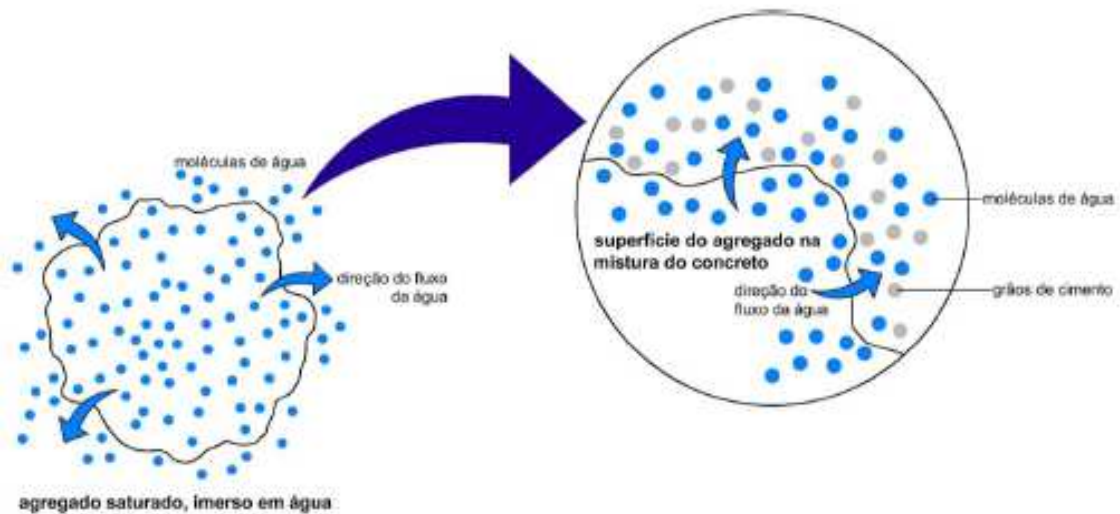


Figura 6 - Representação esquemática do agregado saturado imerso em água e detalhe de sua superfície na mistura do concreto

Fonte: Neville (1997) adaptado por Padovan (2013)

Ao utilizar um agregado para produção de um novo concreto que não sofreu processo de saturação, este poderá continuar absorvendo água da mistura. Com a superfície úmida, haverá retenção de partículas de cimento na zona de transição, consequentemente, melhorando a aderência, e estes grãos de cimento podendo formar uma barreira virtual na superfície de contato entre o agregado e a matriz, a qual reduzirá a capacidade de absorção do agregado reciclado.

2.3.4 Resistência mecânica do AGCR

Os autores Sami e Akmal (2009), em pesquisa onde estudam a influência dos AGCR sobre a resistência do concreto, verificaram que a substituição de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto de maior resistência, origina concretos de resistência mais elevada e a substituição de agregados de menor resistência, geram concretos de pequena resistência. A pesquisa concluiu que o uso de agregado graúdo, oriundo de concreto reciclado com resistência igual a 50 MPa, resultará num concreto com resistência à compressão comparável ao confeccionado com agregado graúdo natural.

Quanto mais resistente for o concreto, no momento da cominuição do mesmo, haverá uma porção elevada de argamassa aderida ao agregado reciclado. Por outro lado, quanto menor a resistência do concreto de origem, quando realizada a britagem, há uma tendência de separação entre as fases, desta forma, resultando uma grande quantidade de material de menor dimensão, composto somente pela fração argamassa e os grãos maiores compostos de rocha mineral e argamassa (PADMINI et al., 2009). Os autores afirmam que

concretos preparados com agregados graúdos de concreto, quanto mais resistente é o concreto de origem, mais resistente será o concreto que o incorpora. Os pesquisadores trabalharam com faixas granulométricas distintas, separando os grãos em dimensões de 10 mm, 20 mm e 40 mm, concluindo que quanto maior a dimensão do agregado, maior é a resistência do concreto com este resíduo. Isto ocorre pelo fato de que em agregados de maior dimensão, há um maior percentual de agregados naturais contidos, proporcionando um material mais resistente. Quanto menor o agregado, maior o percentual de argamassa, o que contribui para diminuir a resistência do conjunto.

Bazuco (1999), em sua pesquisa, utilizando resíduo de concreto nas condições seco e saturado com resistências de 18 MPa, verificou redução nas resistências dos concretos produzidos com RCD aos 28 dias de cura. Salienta ainda que a resistência do concreto de origem do agregado é um fator limitante para a sua incorporação. Butler (2003), ensaiou concretos aos 7 dias e aos 28 dias, utilizando também resíduos de concreto que foram britados aos 7 e 28 dias de cura. Quando os resíduos foram incorporados em uma nova produção de concreto, observou-se que aos 7 dias de cura, a resistência do resíduo e a quantidade de substituição de agregado natural pelo agregado reciclado não interferiram na resistência do concreto, porém quando o concreto foi ensaiado aos 28 dias, houve uma interação maior entre os agregados e a pasta do concreto. Nesta idade, a qualidade do concreto passa a exercer um papel decisivo na resistência do conjunto, pois a hidratação influencia na resistência final.

Conforme Etxeberria et al. (2007), os concretos feitos com RCD, necessitam de maior quantidade de cimento para alcançar a resistência requerida, conseqüentemente, tornando-os menos econômicos. Desta forma, os autores recomendam usar este material em concretos com resistências médias ou baixas (45 a 20 MPa). Eles citam que o ponto mais fraco dos concretos com RCD, em uma matriz de resistência entre 45 a 60 MPa é a resistência dos agregados reciclados.

Com base nos dados apresentados, Werle (2010) afirma que nos concretos que incorporam resíduos de construção e demolição, não é possível generalizar os resultados obtidos pelas pesquisas realizadas no meio acadêmico, pois devido às diferenças metodológicas e diferenças entre os agregados utilizados. Por outro lado, pode-se verificar que a inserção dos resíduos na produção de novos concretos, pode resultar em valores satisfatórios de resistência a compressão.

Conforme Gonçalves (2011), a resistência à tração por compressão diametral dos concretos geralmente se demonstra como uma característica mecânica secundária, visto que o

concreto não se apresenta como bom material para resistir aos esforços de tração das estruturas. Porém, quando se faz um estudo criterioso das propriedades do concreto, principalmente quando são utilizados novos materiais, essa propriedade mecânica não pode ser desprezada.

Lovato (2007), estudando agregado reciclado misto, afirma que todos os traços contendo agregados reciclados possuem menor resistência à tração por compressão diametral, quando comparados com os concretos convencionais. Em sua pesquisa, a redução foi semelhante para as matrizes de diferentes relações a/c, variando de 9 a 41% dependendo o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. Entretanto, fica evidente, que esta redução foi menor para os traços que continham relações a/c mais altas.

De acordo com Troian (2010), os concretos que utilizam 100% de agregado reciclado, atingem cerca de 60% do valor médio relativo aos concretos utilizados como referência. Em sua análise, os concretos com 25% de teor de substituição do agregado natural por reciclado, atingiram aproximadamente 85% do valor médio dos concretos de referência. O autor ainda afirma que o emprego de agregado reciclado oriundo somente de concreto, apresenta vantagens sobre aqueles que empregam agregado reciclado misto.

Portanto, o agregado reciclado é menos resistente que o agregado natural, em função de suas características físicas, apresentando maior porosidade, absorção de água e uma menor massa unitária e específica. Então, para os concretos reciclados produzidos com matrizes resistentes é esperada uma resistência à compressão menor que a resistência à compressão dos concretos com agregados naturais. Contudo, Cabral (2007), concluiu que algumas técnicas podem ser utilizadas para se elevar à resistência dos concretos com agregados reciclados a níveis iguais ou superiores às resistências dos concretos convencionais, tais como o uso de adições minerais (sílica ativa, escória de aciaria, de alto-forno ou de cobre) e aditivos superplastificantes. Conforme Kulakowski et al. (2014), a adição pozolânica nos concretos que incorporam agregados reciclados de concreto (ARC) pode reduzir o efeito negativo do emprego de resíduos de concreto. É destacado, por exemplo, que a utilização de cinza de casca de arroz (CCA) melhora as características de propriedades de concretos produzidos com ARC. Outra maneira de se compensar a perda na resistência é forçar uma diminuição na relação água/cimento dos concretos com agregados reciclados, porém implicando em um maior consumo de cimento.

2.4 PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO E SUA INFLUÊNCIA NO CONCRETO

Mehta e Monteiro (2008) citam como principal diferença entre os agregados reciclados de concreto dos agregados naturais, 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 pode ocasionar queda de desempenho do concreto produzido com o ARC, seja no estado fresco ou no estado endurecido.

Comparando os agregados graúdos reciclados de concreto com os naturais, normalmente os AGCR apresentam menores massas específicas e unitárias. Isso ocorre devido à presença de materiais mais porosos, como a argamassa (LIMA, 1999). Buttler (2003) diz que a massa específica do agregado graúdo influencia na massa específica do concreto, o que é diretamente proporcional à resistência do mesmo. Desta forma, pode-se concluir que, quanto maior a porosidade do agregado, menor será a resistência, pois este acaba tornando-se o componente mais fraco da mistura.

Neto (2011) explana que muitas das propriedades do concreto são influenciadas pelas características de seus agregados, tais como porosidade, composição granulométrica, absorção d'água, forma e textura dos grãos. A compreensão destas características dos materiais é fundamental, tornando-se importantes para uma melhor análise.

2.4.1 Estado fresco

A trabalhabilidade pode ser considerada como uma das propriedades mais importantes do concreto no estado 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 propriedades 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.

As propriedades das pastas de cimento e dos concretos são sensíveis à sequência e intensidade de mistura, e podem influenciar a trabalhabilidade de forma significativa (AGULLÓ et. al., 1999). Segundo Castro e Libório (2005), o grau de uniformidade em um lote de concreto não depende apenas do misturador utilizado, mas também do método e da sequência de incorporação dos materiais constituintes da mistura.

a) Distribuição Granulométrica

Em relação aos agregados naturais, quando apresentam uma granulometria bem distribuída, produzem misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas, além de proporcionar uma estrutura mais fechada de massa de concreto, o que diminui o volume de vazios (NETO, 2011).

Ao utilizar agregados reciclados, deve-se tomar um cuidado especial em relação à granulometria e o tipo de britador a ser utilizado, pois estes dois condicionantes influenciam diretamente nas propriedades do concreto a ser produzido. Buttler (2003), ao avaliar a granulometria do agregado reciclado graúdo, percebe uma redução na dimensão máxima do agregado reciclado em relação ao natural, indicando a influência do britador de mandíbulas sobre a dimensão das partículas. O autor ainda coloca que a idade de reciclagem não influencia na granulometria do agregado, afirmando que agregados de diâmetros menores aumentam a superfície de contato entre pasta/agregado, o que eleva a resistência do concreto.

Conforme Barra (1996), a granulometria dos agregados é importante fator para a dosagem das misturas, influenciando diretamente na trabalhabilidade dos concretos no estado fresco. Esta é uma característica importante do agregado, atuando também na resistência mecânica, assim como sobre o consumo de aglomerantes, absorção de água e fluência do concreto (TOPÇU e SENDEL, 2004).

Conforme Terzian (2005) a diferença na distribuição granulométrica, a forma e o teor do pó dos agregados reciclados exercem influência significativa na resistência do concreto, e devido a este fato, devem ser evitados os agregados com formas lamelares ou alongadas, pois estes apresentam pó aderido à superfície, conseqüentemente, elevando o consumo de água da mistura. Vale salientar que, quanto maior for o tamanho do grão, maior a probabilidade de existir argamassa aderida a este, ou seja, a dimensão da partícula do agregado exerce influência nos concretos produzidos, pois a argamassa aderida contribuirá para uma ligação mais frágil.

b) Forma e Textura

A forma e a textura do AGCR tendem a elevar a quantidade de pasta de cimento, conseqüentemente, influenciando nas propriedades do concreto no estado fresco. A textura muito lisa nos agregados graúdos pode resultar em uma aderência menor entre a pasta de cimento e a superfície dos agregados, prejudicando assim, a resistência à tração do concreto nas primeiras idades (NETO, 2011).

Geralmente, a textura do agregado reciclado é mais rugosa e porosa do que os agregados naturais, apresentando também formas mais angulares com taxas de superfície/volume maiores que os agregados naturais, os quais possuem superfícies mais lisas e arredondadas (LEITE, 2001).

Conforme Mehta e Monteiro (2008), a dimensão e a forma do agregado graúdo podem afetar a resistência do concreto de forma indireta, ou seja, quanto maior o tamanho do agregado no concreto e a proporção de partículas alongadas e achatadas, maior será a tendência de acúmulo de água junto à superfície do agregado, o que enfraquece a zona de transição na interface pasta-agregado. A forma lamelar dos agregados interfere na mistura, especificamente no empacotamento das partículas, e gera um maior número de vazios, que resulta em uma menor resistência mecânica do material (BUEST NETO, 2006).

Lima (1999), afirma que os equipamentos utilizados para o processamento do AGCR podem influenciar em suas propriedades, sendo que o material pode apresentar forma mais lamelar e textura mais áspera que os agregados convencionais. Desta forma, exigindo um aumento na relação água/cimento (a/c) por ser necessário um maior teor de aglomerante devido à perda da trabalhabilidade.

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.

Tristão, (2005) cita que as frações granulométricas e a forma dos grãos estão relacionadas ao empacotamento das partículas. De acordo com Coutinho (2000), analisar a forma dos grãos torna-se importante, devido ao fato que este exerce influência sobre seu

modo de disposição, o qual refletirá na consistência e compacidade do concreto produzido através da incorporação de agregados reciclados.

Portanto, o tipo de britador utilizado para o beneficiamento do material exerce influência sobre a forma do grão e características dos agregados reciclados. Nunes (2007) afirma que os britadores de mandíbulas formam partículas de formas mais angulares, enquanto que os britadores giratórios produzem partículas mais arredondadas. Os agregados reciclados são normalmente mais irregulares e angulares; além de apresentarem texturas mais ásperas e rugosas que os agregados naturais (PEDROZO, 2008).

Segundo a norma ABNT NBR 7211:2009, a forma do grão é avaliada, de acordo com um índice de forma de agregados, o qual, segundo a norma, para o uso em concreto não deve ser ultrapassar a 3. De forma geral, os agregados reciclados atendem a este requisito.

A textura dos agregados reciclados normalmente apresenta-se mais rugosa e porosa, quando comparado aos agregados naturais. É possível perceber que argamassa aderida às partículas do material confere ao agregado reciclado tal aspereza. Ao analisar e comparar ao agregado natural, o material reciclado apresenta uma maior absorção da pasta de cimento através de seus poros superficiais. Leite (2001) cita que esta ocorrência, pode resultar uma maior precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado, ocasionando assim, um maior fechamento da zona de transição do concreto, transformando a matriz e o agregado em um bloco único de material, desta forma, resultando em melhoria no desempenho final do concreto. Por outro lado, vale salientar que, quando o agregado reciclado é inserido ao concreto, este faz com que a mistura se torne muito mais coesa, conseqüentemente, menos trabalhável quando comparada a uma mistura que contenha agregado natural. Com base nisto, o acréscimo de água necessário para compensar esta perda de trabalhabilidade pode levar a uma perda de propriedades mecânicas. No entanto, o uso de aditivos, assim como em concretos convencionais, pode suprir o acréscimo de água para obtenção da consistência necessária.

2.4.2 Estado endurecido

No estado endurecido algumas propriedades são fundamentais e desejáveis no concreto. Dentre as propriedades Helene e Andrade (2007) citam resistência à compressão, massa específica, coeficiente de dilatação térmica, resistência à tração, módulo de elasticidade, e ainda permeabilidade e absorção.

a) Porosidade

Segundo Troian (2010) e Werle (2010), o AGRC, ao apresentar maior porosidade, este fator acarreta na absorção de água do concreto, podendo assim, alterar a demanda de água da mistura do mesmo.

A porosidade dos agregados pode interferir nas propriedades de resistência à compressão, à abrasão e ao módulo de deformação, pois os agregados utilizados na confecção de concretos são habitualmente de resistência superior aos concretos produzidos (NETO, 2011). A qualidade do AGRC é importante para determinação das propriedades mecânicas do novo concreto. A argamassa aderida ao mesmo pode representar o elo mais fraco da mistura, apresentando uma maior porosidade (BUTTLER, 2003). Leite (2001), afirma que conseqüentemente, os concretos produzidos com esses materiais, serão mais deformáveis, pois a porosidade do agregado controla a restrição de deformação da matriz.

Juan e Gutiérrez (2004) avaliaram a influência da quantidade de argamassa aderida ao agregado natural nas propriedades dos agregados reciclados de concreto, constatando que a porosidade da argamassa aderida exerce influência negativa nas propriedades dos agregados reciclados. Os autores ainda afirmam que, quanto maior for a quantidade de argamassa aderida, menor será a densidade do agregado, conseqüentemente, maior será a sua absorção de água. Mehta e Monteiro (2008) recomendam uma quantidade limite de argamassa aderida ao agregado natural de 44%. Amorim (2008) constatou 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.

b) Absorção d' água

Os autores Werle (2010), Troian (2010), Etxeberria (2007) e Leite (2001), alertam para a necessidade de estudar a absorção de água dos agregados reciclados de concreto. Os autores concluíram que, quanto maior a porosidade desse agregado e menor a taxa de saturação do mesmo, maior será a quantidade de água absorvida da matriz de concreto novo no qual está inserido. De acordo com Damineli (2007), a absorção de água tem relação direta 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.

A densidade e a capacidade de absorção dos agregados reciclados sofrem interferência pela argamassa aderida e devem ser analisadas e conhecidas para a produção e controle do novo concreto, pois podem comprometer o mesmo, tanto no estado fresco, quanto no endurecido. A capacidade de absorção é um dos fatores mais significativos dos agregados reciclados, desta forma, tornando-se importante característica para diferenciar estes agregados dos demais (ETXEBERRIA, 2007).

López-Gayarre et al. (2009), cita que a alta absorção de água do AGRC em relação ao agregado natural, influencia diretamente na relação água/cimento. Desta forma, impossibilitando que este fator seja mantido na produção de concreto com mesmo traço, porém com uso de agregado reciclado. Desta forma, sugere-se a utilização de aditivos, como alternativa para compensar esta perda da trabalhabilidade dos concretos.

Etxeberria (2004) associa a absorção de água dos agregados reciclados a três fatores principais, que são:

- Dimensão das partículas;
- Quantidade de argamassa aderida;
- Massa específica dos mesmos.

O autor ainda coloca que a absorção de água do AGCR exerce uma influência importante sobre as propriedades do novo concreto produzido, sendo um aspecto que deve ser observado é a velocidade com a qual a absorção de água acontece. Normalmente, a taxa de absorção durante os minutos iniciais de imersão em água é muito intensa e se mantém 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 (ETXEBERRIA, 2004).

Levando em consideração que a absorção do AGCR interfere na água utilizada para execução dos traços de concreto com este agregado, é importante que se estabeleçam as diretrizes para a compensação da absorção de água deste material. Normalmente, 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. Com base nesta afirmação, alguns pesquisadores, a exemplo de Ferreira (2007) fixou este tempo, como

o necessário para a pré-molhagem do agregado reciclado, levando em consideração que a partir deste período, a absorção de água do AGCR seja insignificante. Porém, os autores Werle (2010) e Troian (2010) estipularam que os agregados reciclados teriam suas taxas de absorção compensadas e, que ao produzir o concreto, o material seria pré-molhado nos 10 minutos antecedentes ao início da mistura.

2.5 MÉTODOS PARA DIMINUIR OS EFEITOS DA ABSORÇÃO DO AGRC

2.5.1 Pré-molhagem

O método de pré-molhagem é o mais comum empregado para minimizar o efeito de absorção de água pelo agregado reciclado durante a mistura de um concreto, é necessário que o AGRC seja acrescido à mistura no estado saturado, com o propósito de mitigar a absorção de água da mistura, ou com um teor de umidade elevado, tornando a absorção pouco expressiva. As formas e tempos apontados para a execução desta pré-molhagem são bastante diversificadas, sendo cumpridas por meio de aspersão da quantidade de água sobre o agregado reciclado ou através de saturação do mesmo.

A pré-molhagem do material reciclado para a fabricação de concretos é sugerida por alguns pesquisadores como Barra (1996), Poon et al. (2004), Etxberria et al. (2007), pelo fato de os agregados absorverem a água designada a hidratação do cimento e à trabalhabilidade do concreto. Diante disto, entende-se necessária a realização de uma compensação da absorção de água do material reciclado empregado para a fabricação de novos concretos.

Oliveira e Vazquez (1996) sugerem que seja feita uma saturação do agregado reciclado, por imersão dos agregados em água, antes da produção do concreto, no entanto esta é uma prática que já não se emprega mais. Já Buttler (2007) esclarece que acaso sejam usados agregados não saturados misturados concomitantemente aos demais materiais da mistura, estes irão absorver uma quantidade expressiva de água e partículas de cimento, acarretando uma densificação do agregado, enfraquecendo, por consequência, a zona de transição e provocando uma diminuição de resistência do concreto. Se for desempenhada a saturação dos agregados antecipadamente à mistura, sucederá a migração da água destes agregados para a pasta fresca. A água absorvida no agregado pode ser definida como água livre, e no momento em que acontecer a movimentação desta na mistura fresca, a consequência será a elevação da relação água/cimento na zona de transição, o que colaborará para o acréscimo do índice de vazios e derivará na perda da resistência.

A água de pré-molhagem absorvida pelos agregados reciclados, pode torna-se disponível na mistura, sendo capaz de hidratar as partículas de cimento não hidratadas, e também de ajudar no processo de cura do concreto. Todavia, isto poderá acontecer dependendo da quantidade do teor de pré-molhagem empregado. A presença de água no agregado propicia também o desenvolvimento de uma boa zona de transição em meio à nova pasta e o agregado reciclado (CABRAL et al., 2007). Devido ao aumento da absorção de água que advém no concreto produzido com agregados graúdos reciclados e areia natural, estes usualmente carecem de 5% mais água do que o concreto convencional a fim de obter a mesma trabalhabilidade (ETXEBERRIA et al., 2007).

A autora Werle (2010) sugeriu a pré-molhagem como forma de controlar o resultado da absorção de água do agregado reciclado, tendo utilizado os teores de 0, 25, 50, 75 e 100% devido à inclinação de absorção de água do agregado, por meio do seguinte método: o agregado é colocado em um invólucro metálico, previamente umedecido, para que a água encarregada à pré-molhagem não seja aderida ao invólucro. A água indispensável para a pré-molhagem é pesada e após este processo, é aspergida sobre o agregado por meio do uso de um regador. À medida que a água é derramada sobre os agregados, esses vão sendo misturados de forma manual, permitindo que sobrevenha uma molhagem homogênea dos grãos. O tempo instituído para a finalização desta fase é de 10 minutos, garantindo que as intervenções sejam alcançadas sem extrapolar os tempos ideais de absorção inicial. Werle verificou que para os resultados alcançados em sua investigação, é provável definir uma possível taxa limite de pré-molhagem de 50%, pois de acordo com os dados, em seguida a esta taxa, acontece uma diminuição na resistência dos concretos produzidos.

Levando em consideração 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.

2.5.2 Adição suplementar de água a água de amassamento da mistura

No momento em que a alternativa escolhida para equilibrar a alta absorção de água do agregado reciclado é a de compensar a água de amassamento da mistura, deve-se empregar uma quantidade de água adicional, que obedece à quantidade total ou parcial de água absorvida por este material, e o agregado graúdo reciclado de concreto, ao se misturar com a pasta de cimento, vai absorver parte desta água. A quantidade de água a se acrescentar

está sujeita ao teor de umidade inicial e da absorção efetiva do AGRC durante o tempo de mistura.

Ao crescer o agregado reciclado seco, as partículas devem ser prontamente cobertas pela pasta de cimento, prevenindo assim, a entrada de água necessária à saturação dos agregados, ou seja, a absorção efetiva não irá coincidir com a absorção de água total do agregado, medida em ensaios normatizados. No caso de se adicionar água extra na mistura, visando levar o agregado reciclado seco a uma condição saturada superfície seca (SSS), isto provocaria que a relação água/cimento da pasta decorresse em um valor mais alto ao almejado. (NEVILLE, 1997).

É importante a noção da absorção potencial e, acaso possível, o progresso da absorção ao longo do tempo, no intuito de que se possa prever a evolução da relação água/cimento depois da mistura. A preferência pelo processo de compensação da água durante a mistura oferece o benefício de que a execução do concreto com AGRC possa ser administrada de modo análogo à produção de um concreto convencional (FERREIRA, 2007). Segundo Brito (2005), a manutenção da trabalhabilidade e da relação água/cimento efetiva exigem precaução, pois um acréscimo da quantidade de água na pasta poderá ter implicações ao nível da porosidade da matriz do novo concreto.

2.5.3 Impregnação com resinas

Salas et al. (2010) produziram concretos com agregados reciclados, aplicando um processo de mistura em duas etapas, o objetivo era permitir uma melhor saturação dos agregados reciclados e assim melhorar a aderência entre as partículas dos agregados e a pasta de cimento. O autor, na primeira etapa da mistura, utilizou agregado reciclado e o cimento, misturando por um minuto e após, 50% da água, misturando por mais um minuto, em seguida inserindo os agregados graúdos, areia e o restante da água, misturando por dois minutos. A proposta dessa ordem de mistura era revestir previamente o agregado reciclado com a pasta de cimento, com o intuito de melhorar a resistência da zona de transição. O efeito dessa alteração foi uma melhora na resistência à compressão, uma redução da profundidade de penetração de água.

2.5.4 Carbonatação do concreto

Belin et al. (2012) estudaram o comportamento de agregados reciclados de concreto carbonatado, destacando o fato de que, mais do que a absorção total de água após 24 horas, a cinética de absorção é um fator de grande interesse para os agregados reciclados, pois

entre os principais resultados os autores ressaltam que a carbonatação pode reduzir significativamente a absorção de água no período crítico, e esta carbonatação permite obter ARC com propriedades semelhantes em termos de absorção do que os agregados naturais. Como período crítico os autores colocam os intervalos de tempo iniciais, compreendido entre o momento imediatamente após a mistura e o momento de lançamento e adensamento do concreto. A Figura 7 apresenta a menor absorção de água dos AGRC carbonatados (Belin et al., 2012).

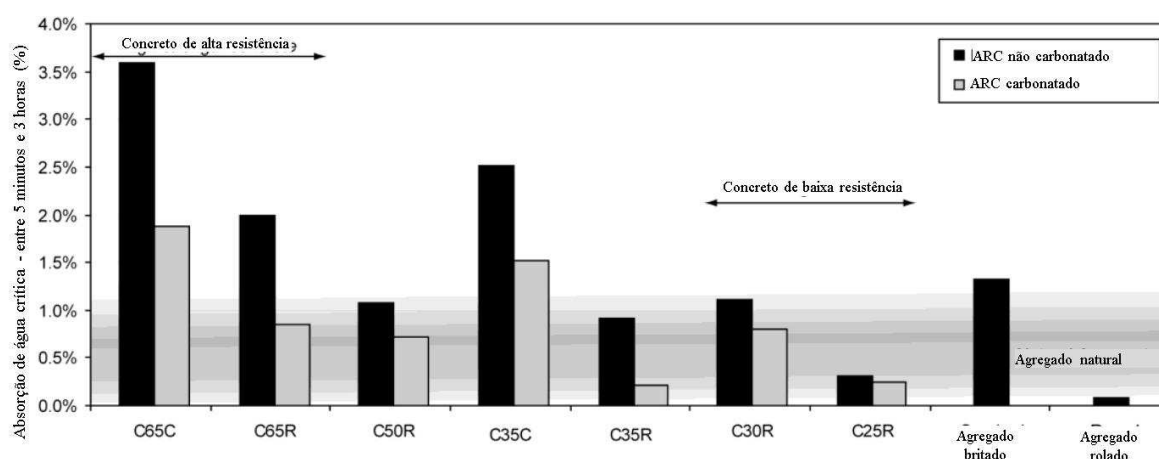


Figura 7 – Evolução da absorção de água crítica para diferentes agregados em comparação ao natural.

Fonte: Belin et al. (2012)

Nos estudos realizados por Frölichet al. (2014), a comparação da cinética de absorção de água, entre ARC não carbonatado e ARC carbonatado, indica que a carbonatação induz a uma redução na massa absorvida no período em torno de 10 minutos (Figura 8, Figura 9). Observa-se, na análise das figuras, que para os agregados de menor dimensão, a diferença na redução da absorção de água é significativa até o final do período de ensaio (72 horas). Já para os ARC de 25 mm, as diferenças são mais significativas no período crítico, provavelmente em função da maior espessura carbonatável do ARC, que, neste caso, não foi completa, ao contrário dos agregados menores.

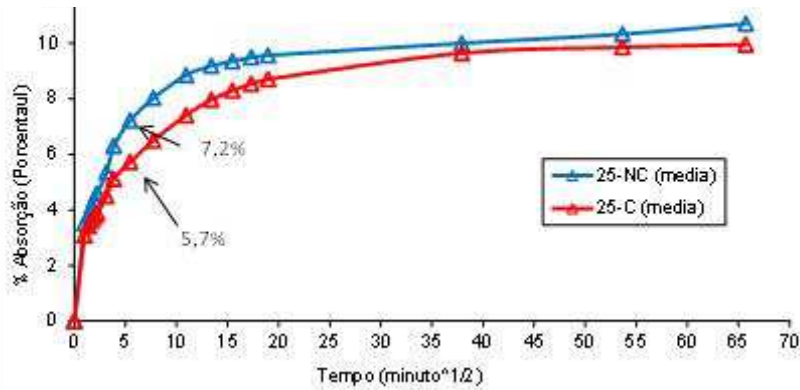


Figura 8 - Curva de absorção de ARC com dimensão de 25 mm não carbonatado e carbonatado.

Fonte: Frölichet al. (2014)

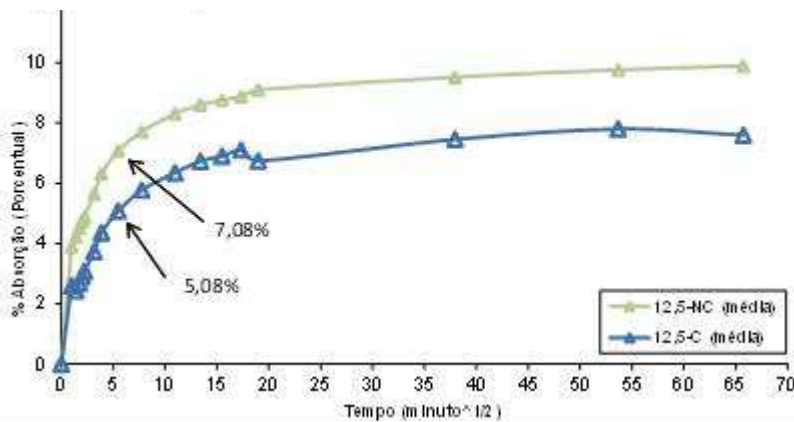


Figura 9 - Curva de absorção de ARC com dimensão de 12,5mm não carbonatado e carbonatado.

Fonte: Frölichet al. (2014)

Além de diminuir a porosidade, a carbonatação dos agregados reciclados pode contribuir para o sequestro de carbono, aprisionando parte do CO₂ emitido na produção e beneficiamento de insumos para o concreto, conforme estudaram Frölichet al. (2014).

2.6 DOSAGEM E PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGRC

Um estudo de dosagem deve ser realizado visando obter a mistura ideal e mais econômica, numa determinada região e com os materiais conforme disponibilidade, para atender uma série de requisitos. Essa série será maior ou menor, segundo a complexidade do trabalho a ser realizado e segundo o grau de esclarecimento técnico e prático do usuário do concreto que demandou o estudo.

Priszkulnik (1977) assegura que a principal finalidade da dosagem do concreto é indicar a quantidade adequada de aglomerante, agregados miúdos e graúdos, água e,

dependendo da situação, aditivos, visando a obtenção de um concreto que obedeça às seguintes condições:

- a) no estado fresco: seja trabalhável e mantenha sua homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e adensamento;
- b) no estado endurecido: apresente, na idade especificada, as propriedades exigidas no projeto estrutural (resistências mecânicas, retração, deformação lenta) acordes com as especificações de cálculo e a aparência exigida no projeto arquitetônico;
- c) seja durável, mantendo suas propriedades ao longo da vida útil prevista para a estrutura, resistindo a eventuais efeitos danosos oriundos de reações entre os seus componentes, e das ações físicas e químicas do meio;
- d) seja econômico.

Tutikian (2004) define dosagem dos concretos como procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos desta mistura, também conhecido por traço. Essa proporção ideal pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível e sempre mais rigorosa a proporção expressa em massa seca de materiais. Hoje, deve-se considerar como materiais passíveis de uso nos concretos e possíveis de serem utilizados num estudo de dosagem: os vários cimentos, os agregados miúdos, os agregados graúdos, a água, o ar incorporado, o ar aprisionado, os aditivos, as adições, os pigmentos e as fibras. Com relação aos agregados, pode ser feita distinção entre agregados reciclados, artificiais ou industrializados e naturais.

Levando em consideração, todo o contexto designado por *Tecnologia do Concreto*, Neville (1997) conceitua o termo dosagem em três possíveis significados:

- a) No sentido mais abrangente seria o estudo direcionado para a escolha dos materiais constituintes e a fixação de suas proporções ou quantidades relativas nas misturas de concreto para assegurar um determinado desempenho.
- b) Em um conceito menos amplo, a dosagem do concreto, seria o procedimento destinado a fixar as proporções dos materiais que deverão ser misturados no preparo do concreto.
- c) Como definição mais restrita a dosagem do concreto poderia ser entendida apenas como “a quantificação dos materiais componentes” durante a produção da mistura do concreto, ou seja, a aplicação do “traço de concreto”.

Tattersall (1978) indica que os concretos produzidos requerem dosagem adequada a cada situação específica. Os condicionantes são definidos pelos projetos arquitetônicos e estruturais, pelos equipamentos a serem utilizados, pelas necessidades de acabamento e também pelas condições ambientais. Os concretos devem ser coesos e viscosos, ou seja, para cada caso devem permitir ser transportados adequadamente até sua posição final, sem apresentar segregação, bicheiras, ninhos, exsudação, variações de cor e escorrimentos exagerados.

Os autores Pope e Jennings (1992), em sua pesquisa, afirmam que a mistura em etapas condiciona uma melhora na resistência à compressão e uniformizam a zona de transição. Eles sugerem separar a ordem de colocação dos materiais, tais como misturar primeiro a argamassa, para em seguida adicionar os demais materiais.

Oyanadel (2009) observou que as misturas em duas etapas são eficientes, e de forma geral, obtêm-se resultados superiores aos utilizados pelo método de mistura tradicional. O autor pré misturava a pasta cimentícia (cimento, adição pozolânica e água) e após, incorporava os agregados. Antes da mistura o autor calculou a umidade dos agregados, de maneira a estimar a umidade livre e a quantidade de água a acrescentar na mistura. Os resultados foram uma maior viscosidade e coesão da pasta, aumentando até 18% na resistência das etapas iniciais.

Tam et al. (2007) utilizaram o processo de mistura em várias etapas. Os autores dividiram o processo de mistura, de forma a gerar nos agregados reciclados uma fina camada de pasta de cimento sobre a superfície. Como resultados, conseguiriam com que a pasta penetrasse nos espaços vazios e nas microfissuras existentes no agregado de origem. Os autores concluíram que esse processo de mistura, que engloba diferentes estágios, tornou-se eficaz contribuindo para a durabilidade de concretos com agregados reciclados.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o foco principal da preparação do concreto pode ser resumido basicamente, como a escolha dos materiais que melhor se enquadram entre os disponíveis e a determinação da combinação mais econômica, de forma que produza um concreto que atenda características de desempenho mínimo estabelecidas. A preparação do concreto é influenciada por uma série de fatores, como a sequência dos materiais, o tempo de mistura e o tipo de misturador. Uma mistura eficiente influencia no comportamento e nas propriedades do concreto, uma vez que distribuem melhor as partículas de cimento, água e agregado (OYANADEL, 2009).

Neste trabalho foi adotado o sistema onde o AGCR não foi submetido a nenhum tratamento. Sendo estes inseridos no início da mistura e também ao final do processo de produção do concreto, pois Schafer et al. (2014) obtiveram bons resultados no estado fresco ao introduzir o AGRC desta forma na mistura, obtendo uma manutenção do abatimento de forma satisfatória por um período mínimo de ½ hora após o término da mistura.

2.7 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS

Nos campos geotécnicos e geoambiental são utilizados os testes de resistividade elétrica, sendo estes aplicados ao solo, devido à sua natureza não-destrutiva, rapidez de execução, além de ser um método de baixo custo efetivo (HAMMAD, 2013). As medições de resistividade elétrica são consideradas uma ferramenta apropriada na investigação de propriedades de solos naturais ou tratados, sejam elas mecânicas, hidráulicas ou de deformação (HASSANEIN et al., 1996).

Entre os fatores que influenciam a porosidade de uma matriz cimentícia, no estado endurecido, estão relação a/c, as adições minerais e químicas utilizadas, os componentes do cimento, o estágio de hidratação (tempo de cura), a proporção dos agregados, as condições de compactação, assim como as condições de cura. Entretanto, no estado fresco, a porosidade da mistura, completamente saturada, corresponde simplesmente ao teor de água utilizado (BRAUN, 2015).

Resistividade elétrica é uma propriedade de medida da oposição de um material ao curso de corrente elétrica, é o obstáculo de movimentação dos íons no concreto, o inverso da condutividade (BARROW, 1964). Resistividade elétrica é a propriedade que assinala a dificuldade de movimentação dos íons no concreto, ou seja, faz o controle do fluxo de íons que se alastram no concreto através da solução aquosa presente nos seus poros, sendo amplamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e a temperatura do concreto. Também é denominada de resistência específica e caracterizada como a resistência elétrica de um material homogêneo e isotrópico, de seção reta e comprimento unitário. A condutividade elétrica é entendida como o contrário da resistividade elétrica (HELENE, 1993).

O concreto pode ser avaliado como um sistema compósito, possuindo diferentes volumes de agregados e fragmentos misturados na matriz pasta de cimento. A resistividade desse compósito fica ligada tanto à resistividade dos fragmentos quanto à resistividade da matriz e da quantia dos dois materiais (MONFORE, 1968). O autor afirma que a

condutividade que se apresenta por meio da umidade do concreto é percebida como um movimento de íons na água evaporável da matriz, sendo que por vezes também nos poros das partículas de agregados. Em caso de fatores que modifiquem volume ou propriedade do líquido ou quantidade de íons, haverá sujeição a modificação da resistividade.

O volume de água no concreto é resultado natural de relação de fatores como a/c, umidade relativa do ar, porosidade, entre outros. Segundo Enevoldsen (1994), é possível tomar como exemplo a umidade relativa do ar, que é fator crucial para o grau de saturação dos poros, controlador da resistividade elétrica do concreto de cobertura e responsável pela limitação da passagem de carga elétrica entre áreas anódicas e catódicas do aço. Quanto mais saturados estiverem os poros de concreto, mais baixa será a resistividade elétrica e mais elevada, teoricamente, a celeridade de corrosão. O grau de saturação dos poros é um dos fatores que exerce controle sobre a disponibilidade de oxigênio na barra de aço, porquanto a propagação de oxigênio é mais vagarosa no estado dissolvido que no estado gasoso. O oxigênio é preponderante para que suceda uma reação catódica.

Scrivener (2013) relata que a resistividade do concreto é uma função regida pelas características da rede de poros e pela concentração de íons livres (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , OH^- , Cl^-) na solução aquosa dos poros, determinando a maior ou menor facilidade da movimentação dos íons.

2.7.1 Resistividade Elétrica no Estado Fresco

Um método, ou dispositivo, que possa quantificar com precisão a resistividade elétrica do concreto no estado fresco torna possível a correlação desta resistividade com a proporção de íons de cimento dissolvidos e, assim, a determinação da relação a/c do concreto e a sua resistência final esperada (MANCIO et al., 2010). Para tanto, Mancio et al. (2010) desenvolveram uma sonda para ser inserida no concreto fresco e, empregando de curvas de correlação, estimar a relação a/c a partir da resistividade medida. Nesta proposta, supõe-se que a alteração do teor de umidade da pasta de cimento em função da absorção da água de amassamento pelo ARC modifique a resistividade elétrica da pasta fresca estabilizada ao longo do tempo. A Figura 10 apresenta a sonda desenvolvida no estudo.



Figura 10 - Sonda de resistividade elétrica para medida da relação água/cimento de concretos no estado fresco

Fonte: Mancio et al. (2010)

Tashiro et al. (1987) afirma que a resistividade elétrica (ou o seu inverso, a condutividade) dos materiais cimentícios é diretamente ligada à porosidade, salinidade da solução líquida e da umidade disponível. Braun (2015) cita que a resistividade elétrica da pasta de cimento, em uma condição saturada, depende das proporções volumétricas relativas da matriz cimentícia e da água livre. Para ocorrer a condução, os caminhos da água, assim como os poros capilares, devem ser contínuos na direção da condução. A mobilidade dos íons na solução do poro de pastas de cimento endurecidas é sensível à distribuição e ao volume dos poros saturados e o grau de saturação dos capilares é dependente da água contida.

Os estudos que já empregaram este método empregaram protótipos do dispositivo, pois ainda não foi desenvolvido comercialmente (MANCIO et al., 2010; GASPARI, 2013; FLÔRES, 2014; BRAUN, 2015). Tal aparelho deve possuir algumas características importantes, como:

- Rigidez: uma vez que são ensaiadas amostras que contém agregado graúdo e com elevada consistência (baixas relações a/c);
- Impermeabilidade: a sonda é inserida no interior da amostra no estado fresco e é constantemente lavada, em função do ensaio;
- Dimensões apropriadas: para permitir a medição de valores de resistividade de uma fração representativa da amostra de concreto e que não permita distorções nos valores.

2.7.2 Resistividade Elétrica no Estado Endurecido

O Método dos quatro eletrodos trata-se de um procedimento controlado pela ASTM G57, originalmente criado para ser aplicado em solos. A adequação para uso em concreto é, atualmente, objeto de estudos, e em decorrência disto foram desenvolvidos

equipamentos que permitem medidas de resistividade in situ, de maneira não destrutiva. A Figura 11 demonstra o esquema elétrico para medida de resistividade.

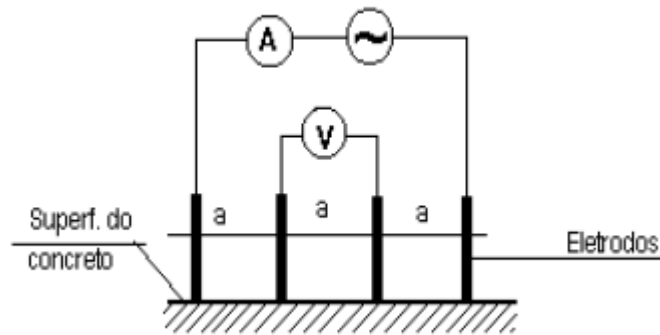


Figura 11 – Esquema elétrico para medida de resistividade.

Fonte: BARROW (1964)

O ensaio é concretizado com o emprego de uma fonte de alimentação de corrente alternada. É aplicada corrente em meio a eletrodos externos. Entre os eletrodos internos é avaliada a diferença de potencial. Para a obtenção de informações fidedignas, os eletrodos necessitam permanecer equidistantes e alinhados. (SHREIR, 1963)

De acordo com Millard et al. (1989), dada a adequação do procedimento dos quatro eletrodos para emprego em estrutura ou laboratório, foram desenvolvidos equipamentos para medida de resistividade de contorno não destrutivo, pois o emprego de eletrodos enterrados em estruturas é inexecutável. Em decorrência disto, verificações realizadas para o desenvolvimento desses equipamentos geraram dados sobre o comportamento do concreto.

Em conformidade com o descrito por Abreu (1998), a resistividade do concreto demonstra-se como uma propriedade muito sensível, e são diversos os fatores que a influenciam. São significantes para a resistividade do concreto, fatores diretamente ligados a sua composição, tais como a relação água/aglomerante, o consumo de cimento utilizado, o tipo de cimento e de agregado e os aditivos e adições empregados. Esses fatores elencados influenciarão o tamanho e a distribuição dos poros, o teor de umidade, a reserva alcalina, a sensibilidade à cura, entre outros aspectos. Esses últimos descritos comprometem as propriedades químicas e físicas do concreto e, de algum modo, também a condutibilidade elétrica - a resistividade.

Helene (1993) argumenta que quanto maior a atividade iônica do eletrólito, menor a resistividade elétrica do concreto. Também entende que o aumento na relação

água/aglomerante, na umidade relativa do ambiente ou eventual presença de íons agressivos como Cl^- , SO_4^{2-} , H^+ e outros, diminuirá expressivamente a resistividade do concreto (NEVILLE, 1997). Novamente Helene (1986) informa que “a resistividade de um líquido é inversamente proporcional ao teor de sais dissolvidos enquanto a de materiais porosos é inversamente proporcional à umidade salina absorvida”. Logo, a resistividade elétrica é bastante influenciada pelo teor de umidade do concreto. Ante esse fato, é necessário diferenciar ao menos duas regiões: uma superficial, que diz respeito ao concreto de cobertura da armadura sujeita a ciclos constantes de molhagem e secagem; outra interna, na qual o teor de umidade do concreto tem maior estabilidade.

Na visão de Brameshuber e Raupach (2003), a resistividade elétrica do concreto está atrelada, sobretudo, à composição química da solução aquosa dos poros, da estrutura dos poros, da umidade e da temperatura do concreto, podendo ele atuar como isolante ou como semicondutor elétrico. A solução aquosa dos poros possui íons positivos e negativos (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , OH^- , Cl^- , SO_4^{2-}) alastrados uniformemente no interior da pasta de cimento endurecida, quando nenhuma corrente elétrica externa está atuando. No momento em que um campo elétrico é formado, os íons positivos (cátions) movimentam-se para o cátodo e os íons negativos (ânions) vão em direção ao ânodo. A carga passante é impedida nos poros descontínuos ou fechados, que então, passam a operar como condensadores, sem comprometer a resistência ôhmica do concreto. A condução iônica na maioria das vezes sobrevém pela fase líquida da solução aquosa dos poros em concretos saturados. Em concretos não saturados a condução sucede pelo filme de água adsorvida nas paredes dos poros. Em concretos extremamente secos, a condutividade é altamente diminuída, tornando o concreto um isolante.

O principal parâmetro controlador das peculiares do concreto é, sem dúvidas, a relação água/aglomerante, que influencia a resistência mecânica e propriedades vinculadas à durabilidade do mesmo. Tratando-se da resistividade elétrica, a relação água/aglomerante possui influência indireta, ou seja, influencia a estrutura dos poros e a concentração iônica da solução aquosa dos poros, atributos que operam diretamente na resistividade elétrica do concreto.

Qualquer acréscimo do volume de água e da concentração de íons na solução aquosa dos poros reduz a resistividade da pasta de cimento e, de fato, a resistividade atenua ligeiramente com o avanço da relação a/c, devido especialmente a maior disponibilidade de eletrólito e maior porosidade. Uma diminuição no gasto de cimento do concreto igualmente

implica em aumento na resistividade elétrica, eis que com relação a/c constante, porém com um consumo diminuído de cimento, há menos eletrólito disponível para a passagem de corrente (NEVILLE, 1997).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental contemplou as atividades executadas no LMC/Unisinos. Os ensaios foram realizados em concretos convencionais e com teor de substituição de 50% de agregados graúdos naturais pelos reciclados, oriundos de resíduos da indústria de pré-fabricados em concreto. O programa experimental foi dividido em etapas onde se buscou atender aos objetivos balizadores do estudo, estabelecendo variáveis relativas às análises, aos materiais e aos métodos de estudo nos estados fresco e endurecido.

Primeiramente, foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais utilizados e, após produção dos concretos, executou-se os ensaios no estado fresco e endurecido. A Figura 12 esquematiza os ensaios realizados neste trabalho.

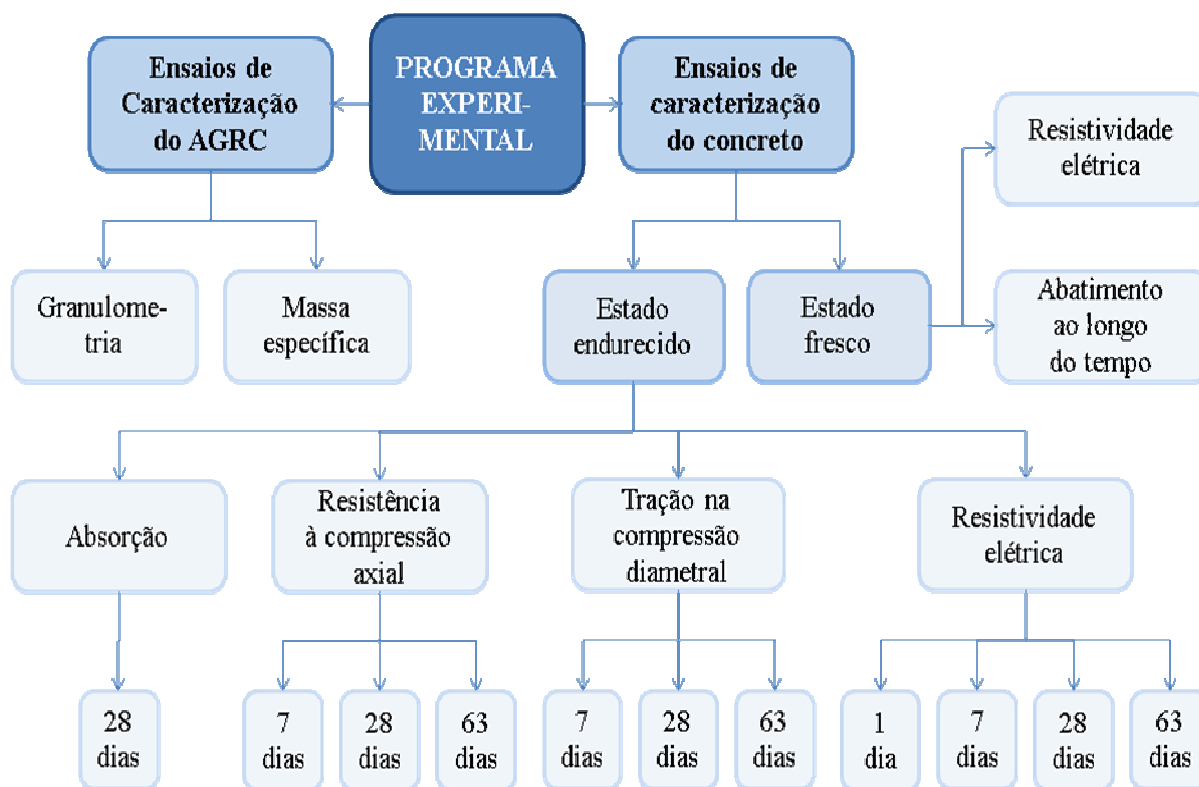


Figura 12 - Fluxograma de ensaios desenvolvidos no programa experimental.

Fonte: Autor (2015).

3.1 FATORES DE CONTROLE E VARIÁVEIS DE RESPOSTA

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.

3.1.1 Fatores de controle

Os fatores de controle irão definir o comportamento de cada uma das variáveis de resposta. Aqui se apresentam os fatores com nível único ou fixo, e os fatores com dois ou mais níveis de estudos, muitas vezes denominados de variáveis de controle, sendo eles:

- **Teor de agregado graúdo reciclado de concreto** fixado em 50% em substituição ao agregado graúdo natural, embasado nos referenciais teóricos atuais. Cabe salientar que o AGRC foi utilizado sem nenhum tipo de pré-molhagem ou compensação de água em função da absorção do agregado reciclado, ou seja, o agregado reciclado foi empregado seco, nas mesmas condições que os demais materiais utilizados na mistura;
- **Relação água/cimento (a/c)** de 0,42; 0,53 e 0,64. Estes níveis reproduzem trabalhos já realizados, possibilitando comparações entre os resultados. A opção por diferentes relações a/c busca também elaborar concretos com diferentes resistências, e assim estudar o comportamento do AGRC em cada classe de resistência do concreto;
- **Método de mistura** foi estudado empregando-se duas diferentes ordens de inserção dos materiais na betoneira ao início da mistura (AGRC inicial ou AGN-i) e ao final da mistura (AGRC final ou AGN f);
- **Umidade de cura** foi um fator de controle empregado principalmente nas medidas de resistividade elétrica no estado endurecido, sendo os níveis de estudo 100% e 70%;
- **Idade** de medida das resistências à compressão e à tração por compressão diametral.

Com relação aos fatores não-controláveis, cabe destacar que, mesmo com pouca relevância, também são capazes de gerar interferências nos resultados dos ensaios (variações climáticas nos dias de transporte dos corpos-de-prova para a câmara úmida, troca de operador de equipamentos, diferenças na geometria e acabamento dos moldes, etc.). Portanto, para minimizar o efeito destes fatores, a ordem de produção dos concretos foi aleatória.

3.1.2 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta estudadas foram:

- Abatimento ao longo do tempo (*slump test*).

- Resistividade elétrica no estado fresco;
- Resistividade elétrica no estado endurecido;
- Resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias;
- Resistência à tração por compressão diametral aos 7, 28 e 63 dias;
- Absorção de água por capilaridade (28 dias);

3.1.3 Tratamento dos dados e análise estatística

Para a realização da análise estatística foi utilizado o software STATGRAPHICS Centurion XVII versão 17.1.06, com a aplicação da ferramenta de Análise de Variância (ANOVA).

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Cimento

O cimento empregado neste trabalho utilizou-se o cimento CP II F-32 (Lote Out/2013). A Tabela 1 apresenta a caracterização química e física do cimento utilizado.

Tabela 1 – Caracterização química e física do cimento Portland CP II F-32.

Requisitos químicos e físicos	Cimento utilizado
Al ₂ O ₃ (%)	4,26
SiO ₂ (%)	18,62
Fe ₂ O ₃ (%)	2,71
CaO (%)	60,75
MgO (%)	4,98
SO ₃ (%)	2,69
Perda ao fogo (%)	4,75
CaO livre (%)	1,44
Resíduo insolúvel (%)	1,11
Equivalente alcalino (%)	0,70
Espansão à quente (mm)	0,23
Início de pega (h:min)	3:15
Fim de pega (h:min)	3:57
Água cons. normal (%)	26,3
Blaine (cm ² /g)	3.285
#200 (%)	2,04
#325 (%)	11,09
fc 1 dia (MPa)	14,0
fc 3 dias (MPa)	27,4
fc 7 dias (MPa)	32,9
fc 28 dias (MPa)	40,7

Fonte: Fabricante (2013).

3.2.2 Aditivo

Para a produção dos concretos foi utilizado aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, caracterizado na Tabela 2.

Tabela 2– Caracterização do aditivo superplastificante.

Característica	Unidade	Valor	Limite mínimo	Limite máximo
pH	Adimensional	6,78	6,00	8,00
Densidade	g/cm ³	1,070	1,055	1,085
Teor de sólidos	%	30,59	29,00	32,00

Fonte: Fabricante (2015).

3.2.3 Agregado graúdo natural (AGN)

O agregado graúdo natural é proveniente de rocha basáltica fragmentada e britada, extraída no Distrito de Linha São Jorge, município de Garibaldi, Região da Serra Gaúcha. O material foi lavado e seco em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ por um período de 48 horas.

A caracterização de massa unitária, massa específica e granulometria foi realizada conforme as normas NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 53 (ABNT, 2006) e NBR NM 248 (ABNT, 2003), respectivamente. A massa específica foi de 2,64 g/cm³ e a unitária de 1,4 g/cm³. A Tabela 3 apresenta os resultados do ensio granulométrico.

Tabela 3– Caracterização granulométrica do AGN utilizado.

Abertura da peneira	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)
25 mm	0	0
19 mm	0	0
12,5 mm	39	39
9,5 mm	39	78
6,3 mm	22	100
< 6,3 mm	0	100

A partir do ensaio de granulometria determinou-se a dimensão máxima do material (19 mm) bem como o Módulo de Finura do mesmo (6,78).

3.2.4 Agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)

O resíduo de concreto utilizado como agregado graúdo neste estudo provém da produção de laje pré-fabricada tipo Rott, com resistência característica f_{ck} de 35 MPa, submetida à cura convencional. Este resíduo sofreu processo de cominuição em um britador de mandíbulas e foi caracterizada a sua granulometria (Tabela 4), resultando em dimensão máxima de 25 mm e módulo de finura igual a 7,25. Neste estudo o AGRC foi utilizado sem nenhum tipo de pré-molhagem ou compensação de água em função da absorção do agregado reciclado, ou seja, o agregado reciclado foi empregado seco, nas mesmas condições que os demais materiais utilizados na mistura.

Sendo a caracterização granulométrica do AGRC muito diferente da distribuição granulométrica do agregado graúdo natural, o AGRC foi separado por frações e sua granulometria foi composta conforme a do agregado natural. A massa unitária e a massa específica do AGRC é de 1,13 g/cm³ e 2,41 g/cm³, respectivamente.

Tabela 4– Caracterização granulométrica do AGRC utilizado.

Abertura da peneira	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)
25 mm	0	0
19 mm	36	36
12,5 mm	43	79
9,5 mm	10	89
6,3 mm	10	99
< 6,3 mm	1	100

A caracterização da absorção de água do AGRC foi realizada pelo método Leite adaptado (WERLE, 2010) e o resultado é apresentado na Figura 13.

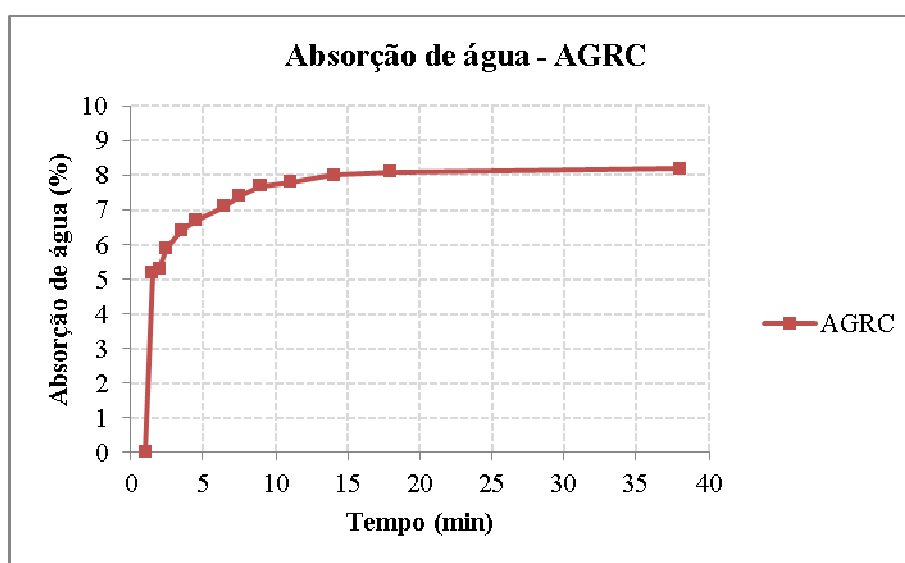


Figura 13– Absorção por imersão dos AGN e AGCR ao longo do tempo.

3.2.5 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado na pesquisa é um agregado natural de origem quartzosa, proveniente da Bacia do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul. Previamente à realização dos ensaios de caracterização, o agregado miúdo foi seco em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ por um período de 48 horas. A massa unitária do agregado miúdo é 1,52 g/cm³ e a massa específica é 2,54 g/cm³. A Tabela 5 apresentam os resultados obtidos a partir destes ensaios, resultando em módulo de finura de 2,12 e dimensão máxima característica igual a 2,4 mm.

Tabela 5– Caracterização granulométrica do agregado miúdo utilizado.

Abertura da peneira	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)
4,8 mm	0	0
2,4 mm	4,3	4,3
1,2 mm	9,9	14,1
0,6 mm	19,0	33,1
0,3 mm	33,3	66,4
0,15 mm	27,4	93,9
< 0,15 mm	6,2	100

De posse dos resultados do ensaio de granulometria, foi elaborada a curva granulométrica do material, identificando-se as zonas ótima e utilizável, conforme o gráfico da Figura 14. A partir desta figura e, de acordo com as determinações da NBR NM 248/2003, pode-se afirmar que o material empregado se enquadra como utilizável.

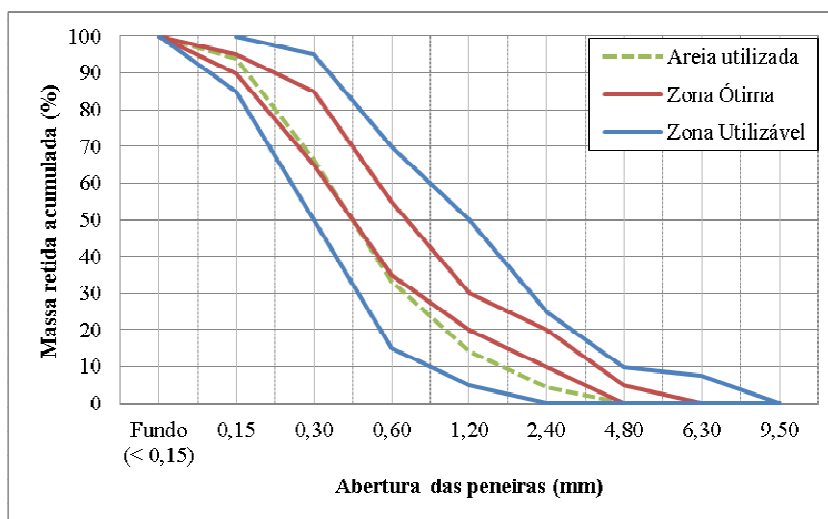


Figura 14 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

3.2.6 Água

A água utilizada para realização dos ensaios proveio do Serviço Municipal de Água e Esgotos (SEMAE) de São Leopoldo/RS.

3.3 DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Este trabalho toma como referência os concretos estudados por Cecconello (2013), Fedumenti (2013), Sartori (2013) e Schafer et al. (2014).

3.3.1 Traços unitários e consumos de materiais

Para efetuar as análises foram produzidos concreto obtido a partir de misturas realizadas em betoneira de eixo horizontal, utilizando-se 90 kg de material seco em cada uma destas misturas. O processo de mistura dos materiais foi realizado em uma betoneira de eixo

vertical com capacidade aproximada de 70 litros, previamente imprimada com argamassa de cimento e areia, no mesmo traço do concreto utilizado.

Foram adotados níveis de relação água/cimento iguais a 0,42; 0,53 e 0,64, possibilitando comparações com trabalhos anteriores (FEDUMENTI 2013; CECCONELLO 2013; SARTORI 2013), enquadrando-se ainda no intervalo estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014 para estruturas de concreto armado, com nível máximo de 0,65. A opção por diferentes relações a/c busca também elaborar concretos com diferentes resistências, e assim estudar o comportamento do AGRC em cada classe de resistência do concreto.

O abatimento dos concretos foi fixado em 120 ± 20 mm e a quantidade de água utilizada nos traços referência para atingir esta consistência foi mantida para os concretos com incorporação de AGRC. Sendo assim, o ajuste da consistência foi promovido através da utilização de aditivo superplastificante.

O presente estudo propôs a reprodução de três traços de concreto padronizados, com teor de umidade de 8,7% e teor de argamassa de 55%, gerando portanto os traços 1:1,75:2,25; 1:2,35:2,75 e 1:2,96:3,24. Foram produzidos concretos de referência e outros dois tipos de concreto substituindo-se 50% do agregado gráudo natural pelo AGRC, variando-se a ordem de inserção deste teor à mistura.

A substituição de AGN por AGRC foi realizada em volume, empregando-se uma massa de AGRC equivalente ao volume de agregado natural substituído, conforme mostra a Equação 1. O consumo de materiais por m^3 de concreto é apresentado na Tabela 6.

$$M_{AGRC} = \frac{M_{AGN}}{\gamma_{AGN}} \times \gamma_{AGRC} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

M_{AGRC} = massa de agregado gráudo reciclado de concreto;

M_{AGN} = massa de agregado gráudo natural;

γ_{AGN} = massa específica de agregado gráudo natural;

γ_{AGRC} = massa específica de agregado gráudo reciclado de concreto.

Tabela 6– Consumo de materiais utilizados em cada traço de concreto produzido.

Traço	AGRC (%)	Relação a/c	Cimento (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	AGN (kg/m ³)	AGRC* (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (%)
1:1,75:2,25	0	0,42	437	765	984	0	184	0,10
1:2,35:2,75	0	0,53	355	836	974	0	188	0,13
1:2,96:3,24	0	0,64	299	884	968	0	191	0,14
1:1,75:2,15	50-i	0,42	437	765	492	449	184	0,30
1:2,35:2,63	50-i	0,53	355	836	487	445	188	0,30
1:2,96:3,10	50-i	0,64	299	884	484	442	191	0,34
1:1,75:2,15	50-f	0,42	437	765	492	449	184	0,32
1:2,35:2,63	50-f	0,53	355	836	487	445	188	0,31
1:2,96:3,10	50-f	0,64	299	884	484	442	191	0,37

AGN = agregado graúdo natural; AGRC = agregado graúdo reciclado de concreto.

3.3.2 Ordem de mistura dos materiais

A proposta desta pesquisa estabelece dois tipos de mistura para cada traço, sendo produzidos concretos com a inserção de Agregado Graúdo Reciclado de Concreto. A primeira mistura tem como proposta o método adaptado, empregado pelo GMAT da Unisinos, cuja sequência é: AGN e AGRC, 1/3 da água de amassamento, cimento, 1/3 da água de amassamento, areia, restante da água de amassamento. A outra mistura tem como propósito a inserção do AGRC ao final, após quatro minutos de mistura (tempo necessário para a homogeneização da mistura dos demais materiais), a fim de garantir menor absorção de água pelo AGRC no processo. A partir deste tempo, procurou-se a homogeneização dos materiais e o ajuste da consistência com o uso do aditivo.

Cabe salientar que o AGRC foi utilizado sem nenhum tipo de pré-molhagem ou compensação de água em função da absorção do agregado reciclado, ou seja, o agregado reciclado foi empregado nas mesmas condições que os demais materiais utilizados na mistura (secos).

A incorporação do AGRC ao final da mistura foi feita conforme Schafer et al. (2014), que afirmaram obter bons resultados no estado fresco ao introduzir o AGRC desta forma na mistura, adaptando o método empregado pelo GMAT da Unisinos. Os autores obtiveram uma manutenção do abatimento de forma satisfatória por um período mínimo de ½ hora após o término da mistura.

3.4 MÉTODOS DE ENSAIO – ESTADO FRESCO DO CONCRETO

Com o intento de alcançar os objetivos nomeados para este trabalho, foi promovido um programa de experiências que permitisse a apreciação da eficácia dos procedimentos para os concretos avaliados. Foram antevistos experimentos para preparação

de análises e resultados, possibilitando a estimativa dos valores dos ensaios do concreto no estado fresco e estado endurecido para as idades testadas.

3.4.1 Resistividade Elétrica

Para investigar a relação entre a resistividade elétrica e a perda de água do concreto fresco para o AGRC, foram realizados ensaios em duas amostras de cada mistura. Após a produção do concreto, uma parte do material foi colocada em cilindros plásticos para realização das medições ao longo de duas horas após o término da mistura. Este período foi estipulado em função do tempo de início de pega do cimento mínimo exigido por norma. Mancio et al. (2010) sugerem em sua pesquisa, que em todas as medições, a sonda deve ser submergida verticalmente na amostra e centralmente localizada dentro do cilindro plástico.

A sonda foi produzida com base nos trabalhos de Mancio et al. (2010) e Braun (2015), levando em consideração as exigências necessárias, onde o corpo do equipamento é formado por barras de polipropileno (material plástico, não-condutor), rosqueadas aos eletrodos metálicos. As peças plásticas e metálicas possuem diâmetro externo de 20 mm. As peças plásticas foram usinadas de maneira a formar pequenos tubos, por onde é possível a passagem dos cabos e que os eletrodos sejam rosqueados, desta forma, obtendo-se um elemento rígido. Na Figura 15, demonstra corte esquemático da sonda, apresentando as medidas em milímetros.

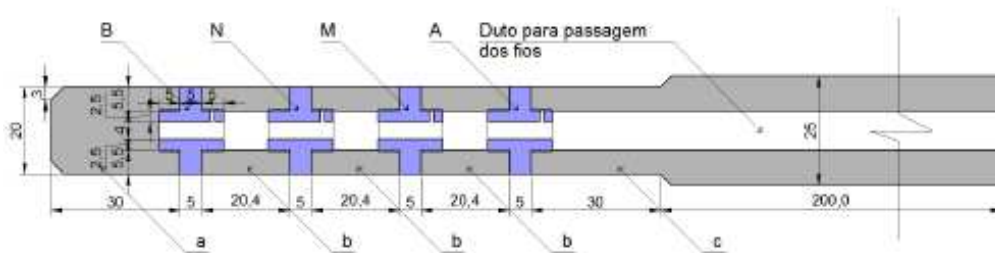


Figura 15 – Corte esquemático da sonda utilizada no ensaio de resistividade elétrica.

Fonte: Braun (2015)

Conforme esquema apresentado na Figura 15, os elementos *A*, *B*, *M* e *N* representam os eletrodos, confeccionados em aço inoxidável, sendo todas as peças idênticas. Já os elementos *a*, *b* e *c* representam as peças confeccionadas em polipropileno, com o objetivo de garantir o isolamento entre as peças metálicas, além de rigidez e impermeabilidade ao conjunto. A fixação do conjunto foi realizada através do sistema de roscas (macho-fêmea).

Foi confeccionada uma única sonda (Figura 16) para realização dos ensaios, sendo esta utilizada tanto para calibração, com as soluções de cloreto de sódio, quanto para os ensaios com todas as amostras de concretos no estado fresco. Como precaução, foram realizadas medições de impedância entre os eletrodos, com o objetivo de verificar possível ocorrência de infiltração, conseqüentemente, curto circuito no interior do dispositivo. Porém, não foi constatado nenhum problema, durante a execução do programa experimental.



Figura 16 – Sonda produzida para os ensaios de resistividade elétrica

Fonte: Autor (2015)

Na realização deste ensaio (Figura 17), foram utilizados dois recipientes cilíndricos, com dimensões de 28 x 40 cm, de material plástico. A adoção deste tipo de recipiente tem por objetivo evitar que o material do mesmo interfira no resultado do ensaio, como por exemplo, na condutividade da amostra, e as dimensões evitam que as paredes do recipiente interfiramos no resultado.



Figura 17 – Realização do ensaio: medição da resistividade elétrica no estado fresco.

Fonte: Autor (2015)

Para os ensaios de resistividade elétrica no estado fresco, foram coletadas duas amostras para cada moldagem, que foram prontamente assentadas dentro do recipiente de ensaio e movidas à sala de climatização, com temperaturas no espaço de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ e com

umidade relativa próxima de 70%, ficando neste local durante a realização das avaliações. Em seguida a este momento as amostras foram descartadas.

Foram realizadas três medições da resistividade elétrica do material em cada amostra a cada dez minutos, num espaço de tempo de quase 2 horas, utilizando duas amostras autônomas para cada prova.

Na Figura 18 são apresentados os componentes do sistema de bancada, utilizado para realização dos ensaios de resistividade elétrica: (A) gerador de funções; (B) resistor conectado em série; (C) multímetro conectado ao resistor, que apresenta a queda de potencial em R_o (V_o); (D) multímetro conectado em paralelo aos eletrodos internos da sonda (V_c); (E) sonda de resistividade elétrica, com dois eletrodos externos conectados ao circuito.

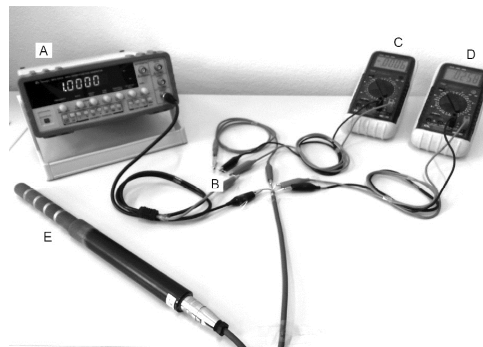


Figura 18 – Componentes do sistema de bancada, utilizado para realização dos ensaios.

Fonte: Braun (2015)

3.4.2 Abatimento ao longo do tempo (*Slump Test*)

A consistência do concreto (Figura 19) foi realizada conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998), e a perda de consistência ao longo do tempo conforme NBR 10342 (ABNT, 2012). Entre os intervalos de medidas, o concreto foi acondicionado de forma a não perder umidade para o ambiente.



Figura 19 – Abatimento ao longo do tempo (*Slump Test*)

Fonte: Autor (2015)

3.5 MÉTODOS DE ENSAIO – ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO

3.5.1 Resistência à compressão axial

O controle da resistência à compressão axial dos concretos foi realizado de acordo com a Norma Brasileira NBR 5739 (ABNT, 2007). Foram empregados três repetições (3 corpos de prova) por idade (7, 28 e 63 dias) para cada mistura analisada.

Antes da realização dos ensaios de ruptura, foi realizada a regularização dos corpos de prova através de retificação das suas bases, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Após, foram realizadas as medições dos corpos de prova preparados, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), com o objetivo de verificar a relação altura diâmetro (h/d) das amostras e realizar as correções necessárias.

3.5.2 Resistência à tração na compressão diametral

O controle da resistência à tração na compressão diametral dos concretos foi realizado de acordo com a Norma Brasileira NBR 7722 (ABNT, 2010). Foram empregados três repetições (3 corpos de prova) por idade (7, 28 e 63 dias) para cada mistura testada.

Com a finalidade de alcançar as características esperadas pelo concreto, é de enorme importância que o processo de cura seja apropriado. Terminada a colocação do material no interior dos moldes, os mesmos foram cobertos com placas de vidro, com o fim de impedir perdas de água de amassamento da mistura para o meio ambiente por evaporação. Decorridas 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e movidos a um espaço controlado (câmara úmida), com temperaturas no intervalo de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e com umidade relativa do ar superior a 95%, em conformidade com a NBR 9479 (ABNT, 2006). Os corpos de prova continuaram neste recinto de cura até completas as idades de ensaio.

3.5.3 Absorção de água por capilaridade

A determinação de absorção de água por capilaridade dos concretos foi realizada conforme recomendações de RILEM TC 116 PCD (1999) adaptada por Troian (2010) e Werle (2010), cujo esquema de ensaio é apresentado na Figura 20. Tem-se observado que existe uma variabilidade grande no ensaio quando se emprega fatias de corpos de prova extraídas de diferentes alturas ao longo dos 20 cm de um corpo de prova cilíndrico. Este fato pode estar vinculado à eventual exsudação ao longo desta altura. Desta forma, foram utilizados corpos de prova prismáticos com dimensões de 60 mm x 60 mm x 180 mm, sendo extraídas 3 fatias de 3 cm de espessura da porção central deste prisma.

A preparação das amostras foi realizada submetendo-se as fatias com 28 dias de idade à secagem em estufa a 100°C sendo, posteriormente, pesadas a cada 24 horas até a constância de massa (definida como uma mudança de peso inferior a 0,1 %, em um período de 24 horas). Após a secagem, as fatias tiveram suas faces laterais seladas com fita tape e a face superior recoberta com um filme impermeável ao vapor d'água e flexível (Figura 20). As leituras da variação de massa foram realizadas através da pesagem das amostras nos intervalos de tempo de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas.

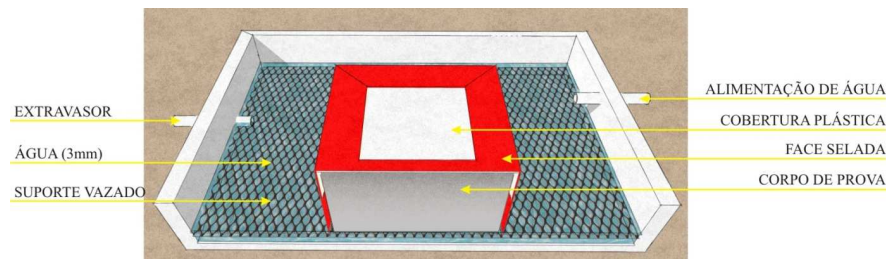


Figura 20 - Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Fonte: Autor (2015).

3.5.4 Resistividade elétrica no estado endurecido

A resistividade elétrica no estado endurecido emprega o método pelo princípio da sonda Wenner (Figura 21).

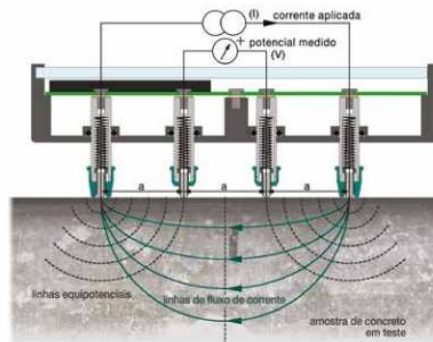


Figura 21 - Esquema do método de ensaio de resistividade do concreto no estado endurecido.

Fonte: Proceq (2014).

Para analisar os valores de resistividade elétrica dos concretos estudados, foram produzidos corpos de prova de 75 mm x 75 mm x 285 mm (Figura 22). Sendo produzidos três CP's para cada traço e ambientes propostos (umidade 100% e 75%), às idades de 1, 7, 28 e 63 dias, através de um ensaio não destrutivo, com o equipamento denominado RESIPOD, conforme Figura 22, operado pela sonda de Wenner com quatro eletrodos equidistantes, afastados 50 mm entre si.

O aparelho funciona através dos quatro eletrodos que são colocados em contato direto com a superfície do concreto, previamente umedecida. O equipamento RESIPOD fabricado pela PROCEQ SA, no qual compreende a evolução do padrão industrial do resistivímetro RM MKII fabricado pela C.N.S Eletronics LTD. imprime uma corrente entre os dois eletrodos externos e, conseqüentemente

, uma voltagem é captada pelos eletrodos internos como representado.



Figura 22 – Ensaio de resistividade elétrica no estado endurecido

Fonte: Autor (2015).

Para realização deste ensaio, foi necessário conforme indicação do fabricante, borrifar água natural sobre os corpos de prova. Sendo efetuadas três leituras na superfície superior das amostras. O resultado obtido para a resistividade elétrica resultou na média aritmética dos valores individuais para cada composição.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios previstos no capítulo anterior. Num primeiro momento, serão apresentados os resultados relativos aos ensaios realizados no concreto em seu estado fresco. Posteriormente, apresentar-se-ão os resultados dos ensaios em concreto no estado endurecido.

4.1 RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DO CONCRETO

No estado fresco do concreto foram realizados ensaios de abatimento ao longo do tempo e de resistividade elétrica que são apresentados a seguir.

4.1.1 Abatimento ao longo do tempo

A Figura 23, a Figura 24 e a Figura 25 apresentam a perda percentual de abatimento em relação à primeira medição desta grandeza, para os concretos de relação a/c 0,42, 0,53 e 0,64, respectivamente.

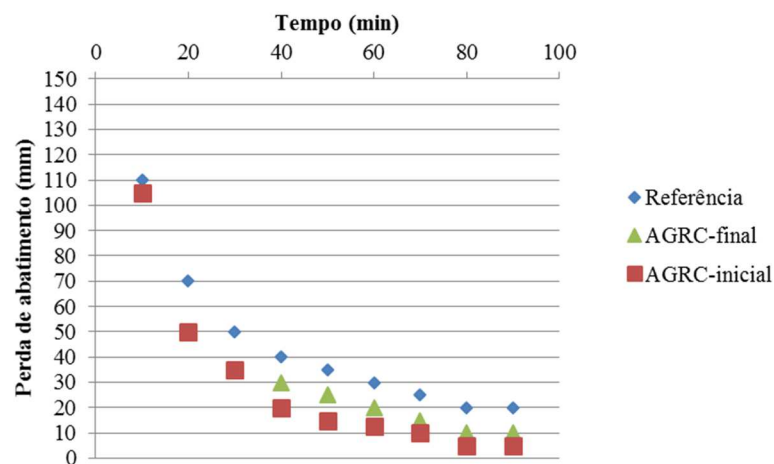


Figura 23- Abatimento ao longo do tempo dos concretos com relação água/cimento igual a 0,42.

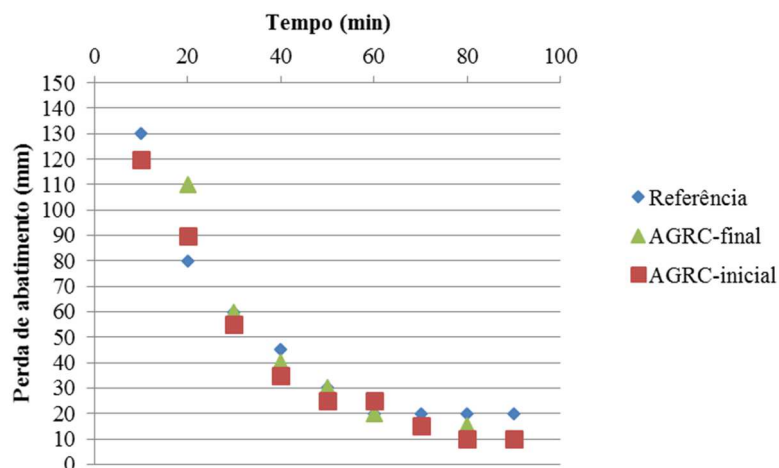


Figura 24- Abatimento ao longo do tempo dos concretos com relação água/cimento igual a 0,53.

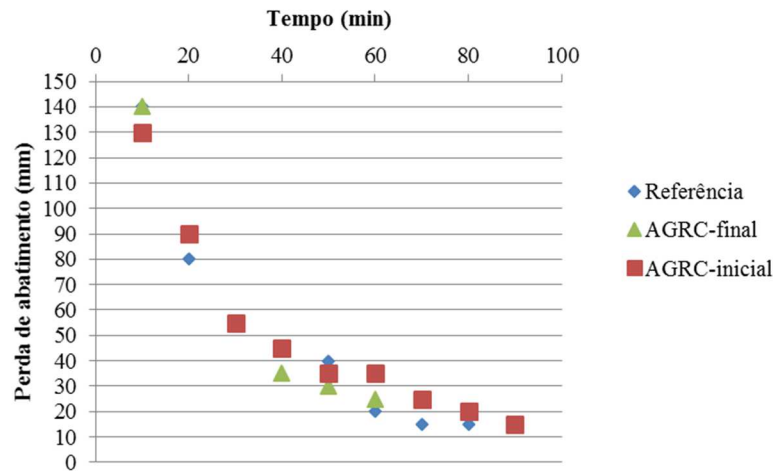


Figura 25- Abatimento ao longo do tempo dos concretos com relação água/cimento igual a 0,64.

Para o concreto de relação a/c 0,42 (Figura 23), percebe-se que o traço referência apresentou menor perda de abatimento ao longo do tempo, seguido dos traços com substituição de 50% de AGN por AGRC-f e por AGRC-i. Os resultados ratificam Troian (2010), que relaciona a maior porosidade do AGRC em comparação ao AGN com o aumento na demanda de água da mistura dos concretos produzidos com AGRC.

Ainda sobre os resultados apresentados na Figura 23, percebe-se que o traço com incorporação de AGRC na etapa inicial da mistura apresentou maior atenuação da perda de abatimento ao longo do tempo. Este fenômeno relaciona-se com a velocidade de absorção de água do AGRC que, conforme Etxeberria (2004), é muito intensa durante os minutos iniciais e, gradualmente, torna-se lenta e pouco significativa. Deste modo, é consenso que o abatimento ao longo do tempo do traço com incorporação do AGRC na etapa inicial seja mais afetado em relação à incorporação realizada na etapa final da mistura.

A Figura 24, referente aos concretos de a/c 0,53, traz uma nova configuração da "curva de perda de abatimento" em relação aos concretos de a/c 0,42. Isto porque, aos 10 minutos, o traço referência apresenta maior abatimento em relação aos traços com AGRC. No entanto, aos 20 minutos, a menor perda de abatimento foi apresentada pelo concreto com AGRC-f, ou seja, pode-se perceber que existe uma influência do momento em que o AGRC é incorporado no concreto. Na medida em que os ensaios são reproduzidos ao longo do tempo, percebe-se que, em geral, para esta relação a/c não parecem haver diferenças tecnicamente significativas entre as perdas de abatimento dos concretos.

Sobre gráfico da Figura 25, que expressa os resultados de perda de abatimento ao longo do tempo para concretos de relação água/cimento 0,64, pode-se afirmar que o comportamento segue a tendência inicial dos concretos de relação a/c 0,53, ou seja, com o traço referência sofrendo maior perda de abatimento aos 10 minutos. No entanto, em idades mais avançadas, de maneira geral, para estes concretos com relação a/c 0,64, a perda de abatimento é menor para os concretos com AGRC.

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) do abatimento inicial, aos 10 minutos, apresentada na Tabela 7, de forma a verificar se os fatores de controle 'a/c' (relação água/cimento) e 'mistura' (que considera o método de dosagem do concreto e a presença do AGRC). Não foi possível analisar o efeito da interação entre os fatores de controle em função de que o experimento não tem repetição.

Tabela 7 – ANOVA para abatimento inicial.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Signif. - p	Efeito significativo
a/c	505,556	2	252,778	9,10	0,0325	Sim
mistura	822,222	2	411,111	14,80	0,0142	Sim
Erro	111,111	4	27,7778			
Total corrigido	1438,89	8				

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada

A ANOVA para o abatimento aos 10 minutos, indica que tanto a relação a/c como o tipo de mistura apresentam efeito significativo sobre o abatimento inicial. A Figura 26 e a Figura 27 apresentam as médias do efeito isolado de cada fator de controle sobre a variável de resposta

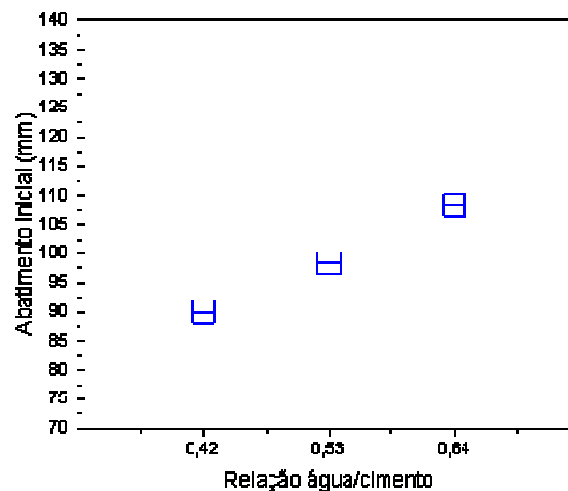


Figura 26 – Médias do efeito do fator a/c sobre o abatimento inicial.

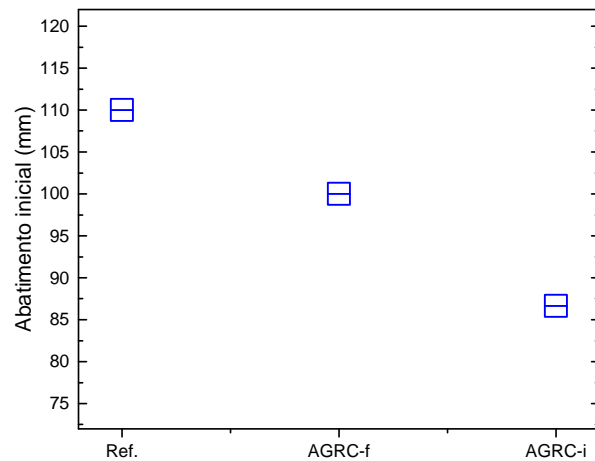


Figura 27 - Médias do efeito do fator mistura sobre o abatimento inicial

O efeito isolado da relação a/c sobre o abatimento apresenta um comportamento esperado, ou seja, quanto maior a relação a/c, maior o abatimento. No entanto, a grande contribuição desta análise refere-se ao efeito isolado do tipo de mistura sobre o abatimento inicial. Ou seja, em média, a diminuição do abatimento, em relação ao concreto referência foi de 21% quando o AGRC é introduzido no início da mistura e de apenas 9% quando a incorporação do agregado reciclado é realizado ao final da mistura.

Mesmo não sendo possível, por ANOVA, verificar se a interação entre os fatores apresenta efeito significativo sobre o abatimento inicial, foi construído um gráfico apresentando o efeito associado dos dois fatores sobre o abatimento inicial (Figura 28).

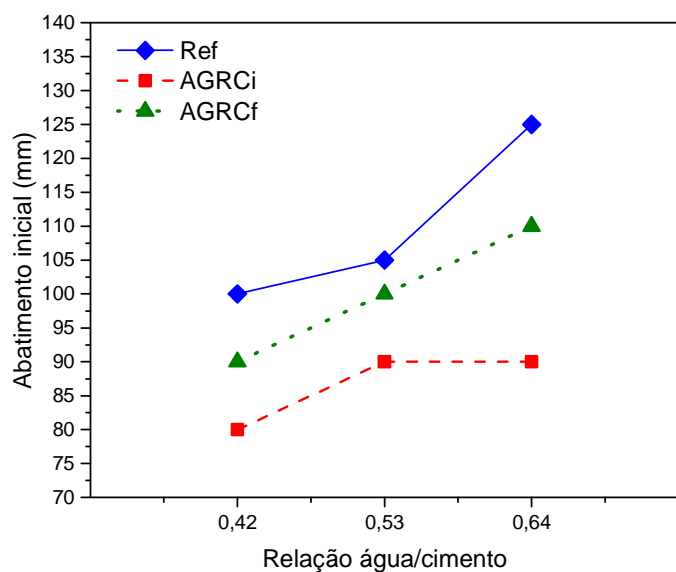


Figura 28 – Efeito associado da relação a/c e da mistura no abatimento inicial.

É possível verificar na Figura 28 que inserir o AGRC ao final da mistura, para todas relações a/c, resulta em abatimentos maiores do que quando ele é introduzido no início da mistura. Ou seja, ao inserir o AGRC ao final da mistura e realizar a medida de abatimento 10 minutos depois de colocar o cimento em contato com a água, mostra que uma menor absorção de água por parte do AGRC.

4.1.2 Resistividade elétrica

Outra propriedade mensurada nos concretos ainda em seu estado fresco é a resistividade elétrica. A Figura 30, a Figura 31 e a Figura 35, mostram a variação desta propriedade em função do tempo para os concretos com relação a/c, 0,42, 0,53 e 0,64, respectivamente. Foram realizadas 3 medições da resistividade elétrica do material a cada 10 minutos, num intervalo de aproximadamente 2 horas após a mistura, para as relações a/c, utilizando duas amostras independentes para cada ensaio.

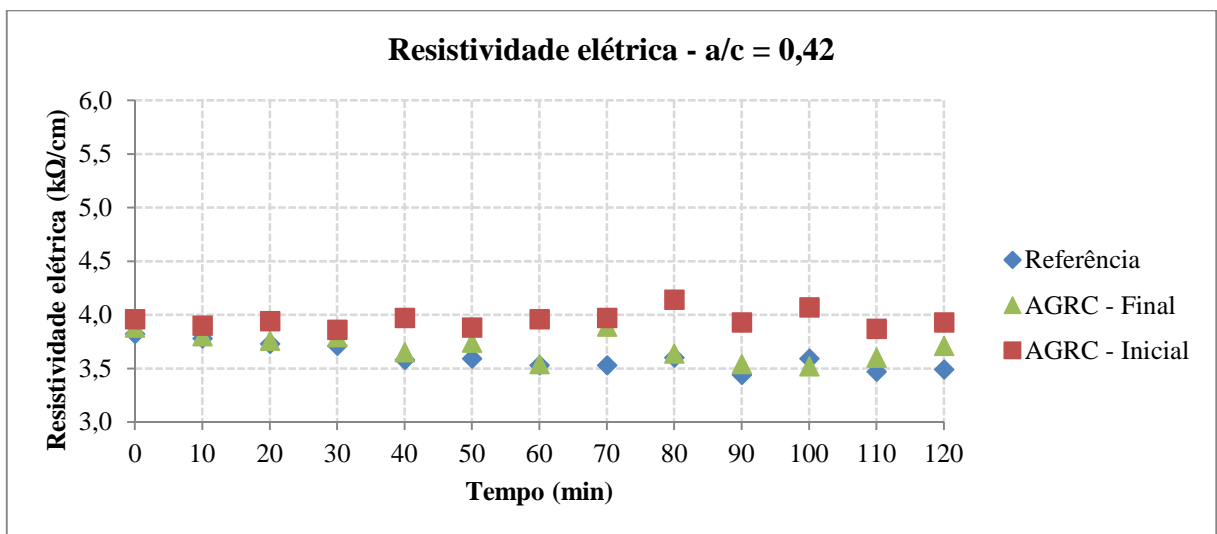


Figura 29- Resistividade elétrica dos concretos com relação água/cimento igual a 0,42.

Através da Figura 29, pode-se perceber que, para os concretos de relação a/c 0,42, a maior resistividade elétrica é conferida pelo traço com incorporação de AGRC na etapa inicial da mistura. Este resultado é consistente com o esperado, pois neste caso há uma maior absorção de água pelos agregados reciclados (os quais não foram submetidos a pré-molhagem), reduzindo assim o teor de água na mistura e aumentando a resistividade. Ao mesmo tempo, estes resultados confirmam a expectativa que, ao serem adicionados ao final da mistura (quando a água já está misturada com o cimento, formando a pasta) nesta relação a/c os AGRC de fato não conseguem absorver água, apresentando um comportamento muito

semelhando ao AGN. Aos 120 minutos, vê-se que a tendência de resultado segue o padrão dos resultados de abatimento, com o traço referência apresentando menor resistividade, seguido dos traços 50% Final e 50% Inicial, respectivamente.

Os resultados da Figura 30, referentes aos concretos de a/c 0,53, apresentam uma configuração de variação ordinária constante entre os traços estudados. No período inicial (até 40 minutos), o traço Referência apresenta menor resistividade elétrica entre os três estudados. Neste caso, observa-se um comportamento distinto daquele observado para a relação a/c mais baixa. Aqui, a ordem de mistura aparentemente não influenciou na absorção inicial de água por parte do AGRC durante a mistura, tanto que ambos traços apresentaram basicamente a mesma resistividade elétrica. A partir dos 40 minutos, a cada aferição da resistividade, os resultados dos traços alternam entre si, assumindo valores muito próximos entre eles.

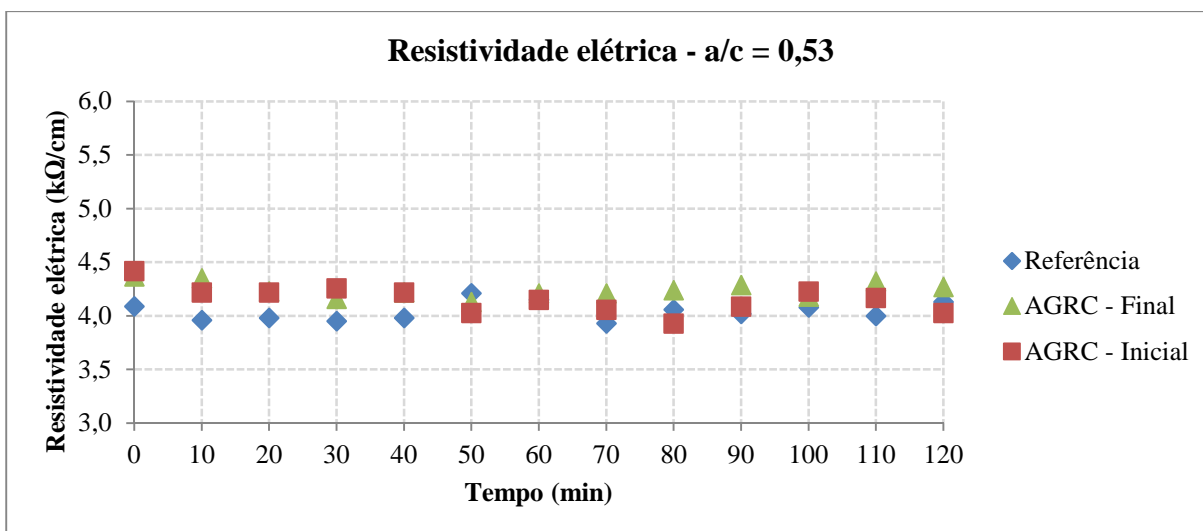


Figura 30- Resistividade elétrica dos concretos com relação a/c igual a 0,53.

Já para os concretos de relação água/cimento 0,64, os resultados expressados na Figura 31 mostram que há um pico de resistividade do traço 50% Inicial no período entre 20 e 90 minutos, seguidos dos traços 50% Final e Referência, respectivamente. Assim como observado para a relação a/c 0,42, estes resultados são consistentes com a maior absorção de água apresentada pelo AGRC quando adicionado no início da mistura. Cabe ressaltar que esta maior absorção irá levar a uma diminuição da relação a/c da mistura, possivelmente levando a uma redução da resistividade ainda no estado fresco e, principalmente, a um aumento de resistência no estado endurecido.

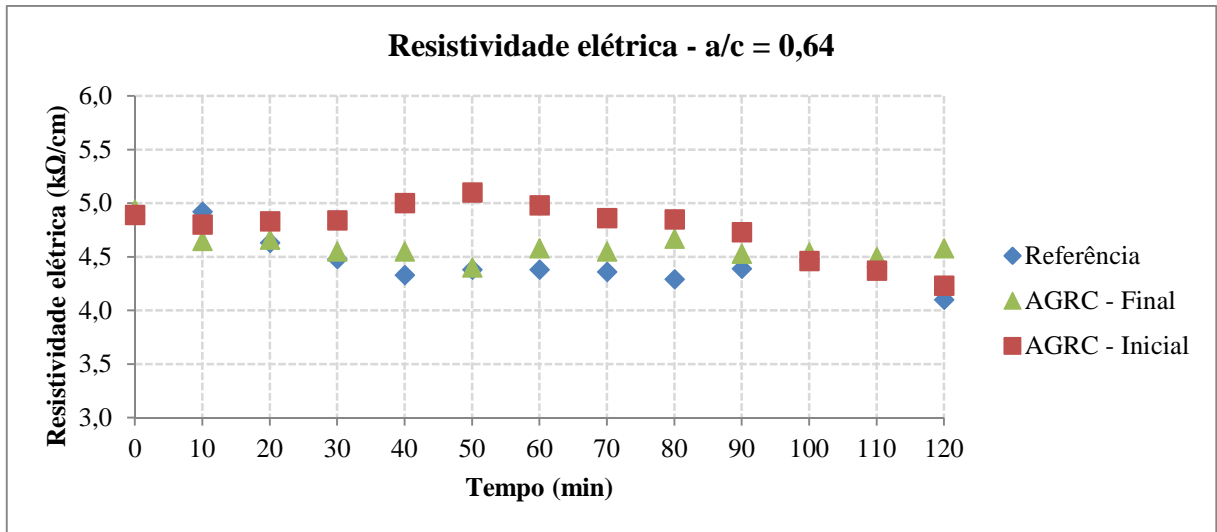


Figura 31- Resistividade elétrica dos concretos com relação água/cimento igual a 0,64.

Tendo em vista que, em geral, os resultados de resistividade elétrica no estado fresco tiveram pouca variação ao longo do tempo, para realizar análise de variância, tomou-se como fatores de controle, novamente, apenas ‘a/c’ e ‘mistura’. A Tabela 8 apresenta o resultado desta análise

Tabela 8 – ANOVA para resistividade elétrica no estado fresco.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Signif. - p	Efeito significativo
a/c	14,3024	2	7,15122	321,02	0,0000	Sim
mistura	1,26679	2	0,633396	28,43	0,0000	Sim
a/c X mistura	0,438326	4	0,109582	4,92	0,0011	Sim
Erro	2,40589	108	0,0222768			
Total corrigido	18,4135	116				

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada

Como já discutido, tanto a relação a/c como a mistura apresentam efeito significativo sobre a resistividade elétrica no estado fresco, bem como a interação entre eles. A Figura 32 e a Figura 33 apresentam as médias dos efeitos dos fatores isolados sobre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a Figura 34 apresenta o efeito da interação entre os fatores estudados.

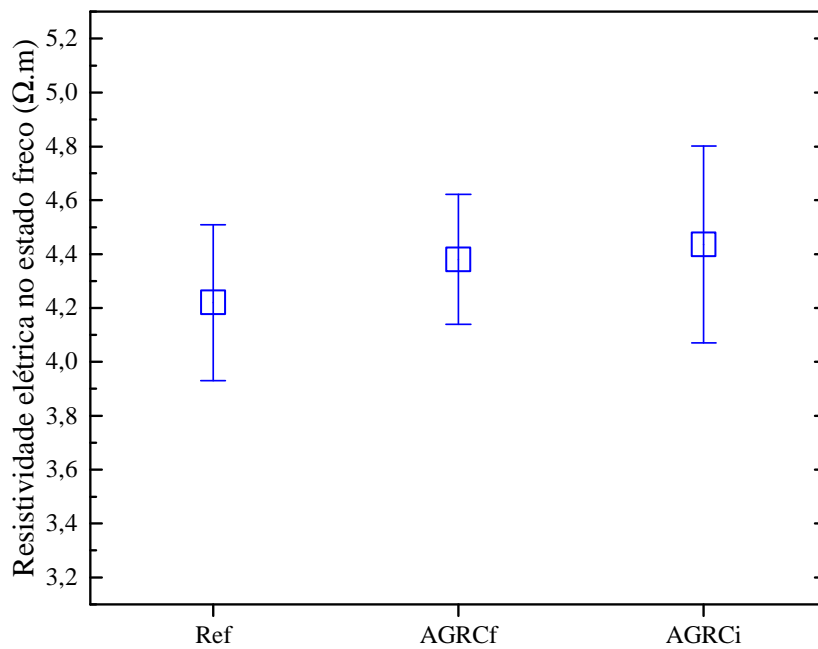


Figura 32 – Médias do efeito da ‘mistura’ sobre a resistividade elétrica no estado fresco.

Pode-se perceber, pela análise da Figura 32, que a ordem de mistura do AGRC no concreto fresco influencia a resistividade elétrica no estado fresco, fazendo com que as diferenças entre o concreto de referência e o concreto com AGC no final sejam menores do que entre o concreto referência e o concreto com AGRC sendo colocado no início da mistura.

Na Figura 33 pode-se visualizar o efeito da relação a/c sobre a resistividade elétrica no estado fresco, cujo comportamento segue o padrão esperado. Os concretos de maior relação a/c apresentam maior resistividade elétrica, pois quanto mais água menor é a concentração de íons e menor é a capacidade da solução em conduzir a corrente elétrica.

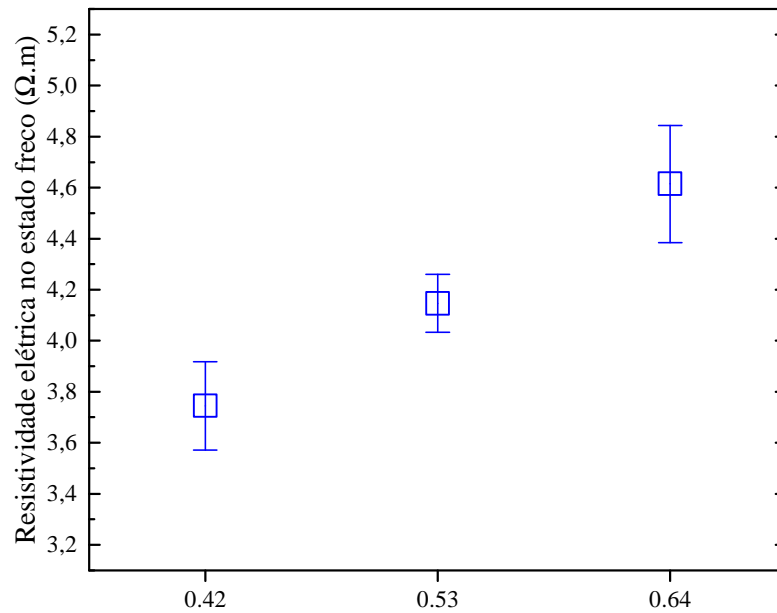


Figura 33 – Médias do efeito da relação a/c sobre a resistividade elétrica.

Na Figura 34, percebe-se, com exceção da relação a/c 0,53 com o AGRC sendo introduzido no início da mistura, que adicionar o AGRC ao final da mistura traz benefícios para as propriedades do concreto no estado fresco, pois o comportamento do concreto é muito próximo ao concreto de referência.

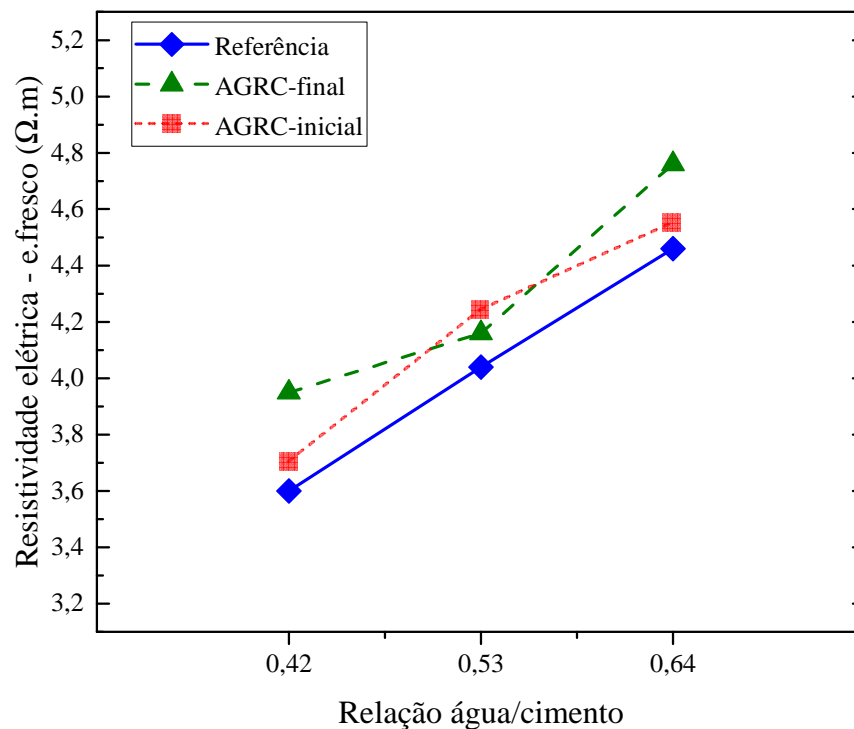


Figura 34 – Médias do efeito da interação entre relação a/c e mistura na resistividade elétrica do concreto no estado fresco.

Com base nos valores apresentados, quanto maior a relação a/c, maior será a resistividade elétrica. Com exceção da relação a/c 0,53; também é possível avaliar que a mistura onde o agregado foi inserido inicialmente, devido ao fato da perda de água para o AGRC, apresenta maior resistividade elétrica por conta da dificuldade da movimentação dos íons.

4.2 RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em amostras de concreto no seu estado endurecido.

4.2.1 Resistência à compressão

As amostras de concreto foram ensaiadas à compressão em três idades distintas: 7, 28 e 63 dias. A Figura 35, a Figura 36 e a Figura 37 apresentam os resultados obtidos para a resistência à compressão média em cada uma destas idades.

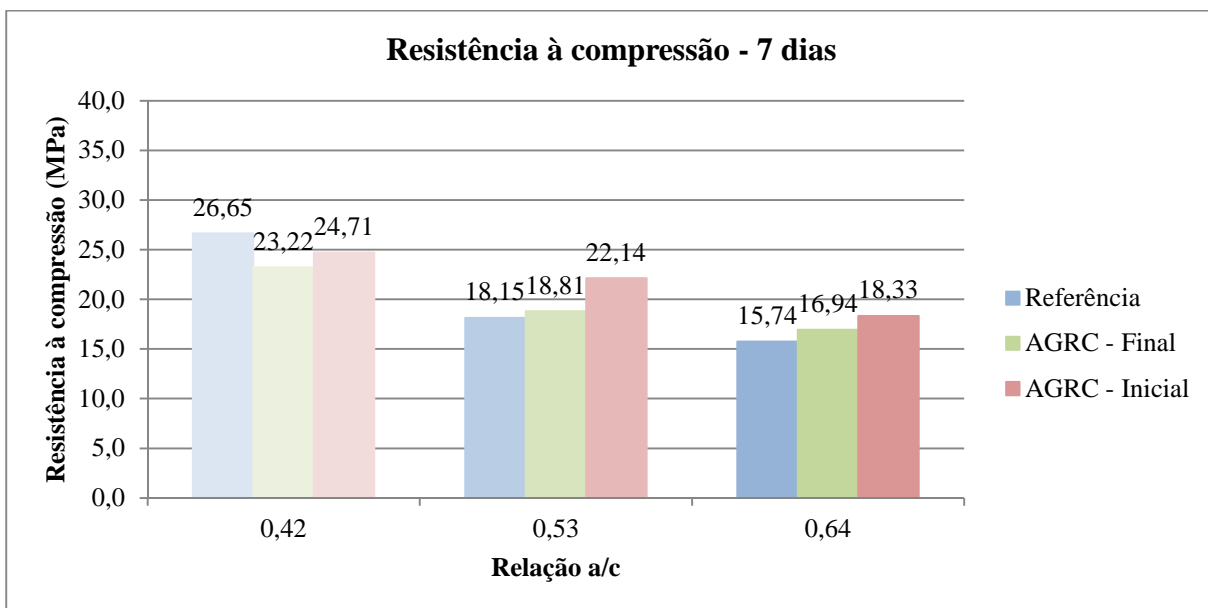


Figura 35- Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias.

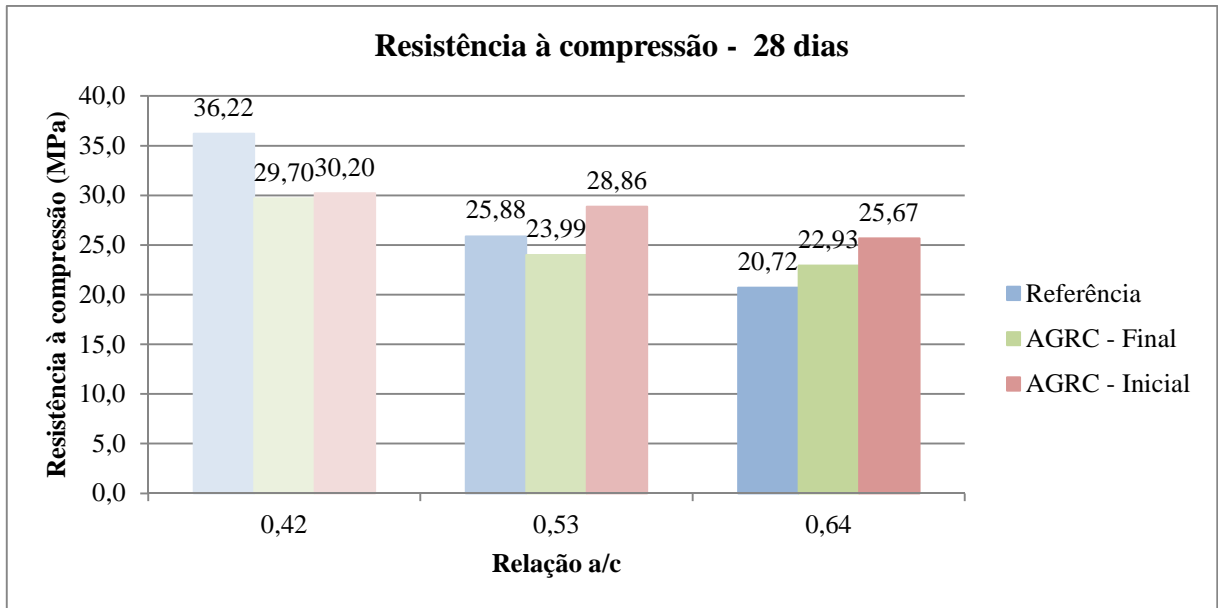


Figura 36- Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.

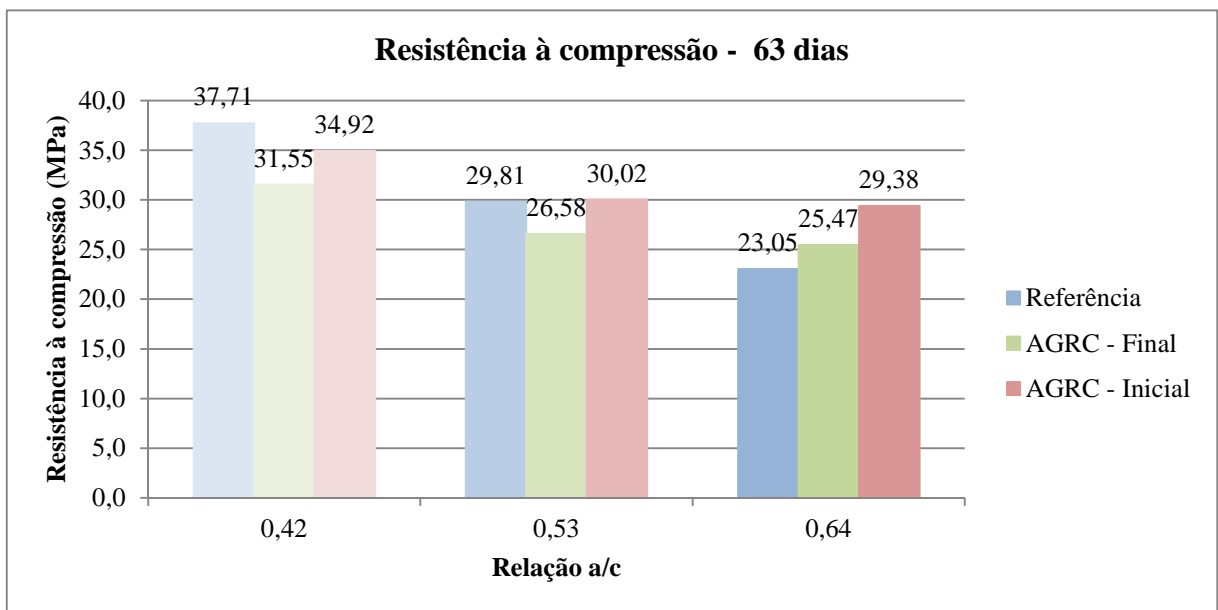


Figura 37- Resistência à compressão dos concretos aos 63 dias.

A partir dos gráficos da Figura 35, da Figura 36 e da Figura 37 pode-se perceber variações no comportamento dos resultados de resistência à compressão, tanto entre os traços reproduzidos como em função da idade das amostras.

Para os concretos de relação água/cimento 0,42, os gráficos mostram que as resistências do traço de Referência, nas três idades, foram superiores às resistências obtidas para os concretos com incorporação de AGRC. Este fato pode ser explicado pela maior resistência mecânica do AGN em comparação ao AGRC, afinal quanto mais alta a resistência do concreto, maior é a importância da resistência dos agregados para esta propriedade. Além

disso, a resistência à compressão dos concretos com substituição de AGN por AGRC na etapa inicial foi superior àqueles produzidos com a incorporação de AGRC na etapa final da mistura. Esta tendência também fica evidente nas três idades.

Já os resultados de resistência à compressão dos concretos de relação a/c 0,53 revelam outra tendência. Neste caso, aos 7 dias de idade, as amostras de concreto com substituição de AGRC apresentaram desempenho mecânico à compressão semelhante às amostras de Referência. Aos 28 dias de idade, as amostras do traço 50% Inicial obtiveram melhores resultados de resistência à compressão, seguidas do traço de Referência. Com 63 dias, o desempenho mecânico à compressão do traço 50% Inicial revelou uma condição de igualdade em relação ao traço de Referência e acima dos concretos produzidos com substituição de AGRC na etapa final de amassamento.

No caso das amostras produzidas de concreto de relação água/cimento 0,64, vê-se que, em todas as idades, os traços 50% Inicial revelaram-se superiores com relação ao desempenho mecânico de compressão, seguidos dos traços 50% Final. Para estes concretos, os traços de Referência apresentaram médias de resistências à compressão aquém dos resultados obtidos para os concretos com a incorporação de resíduo (AGRC).

Os resultados das amostras de concretos com incorporação de AGRC produzidas pelos traços 0,53 e 0,64 confirmam Werle (2010), que acena para a possibilidade de um desempenho satisfatório à compressão de concretos com incorporação de resíduos de demolição. Esta afirmação é respaldada pelos resultados de resistência à compressão que, inclusive, apresentaram valores maiores para os traços com AGRC em relação aos traços "Referência".

Conforme Etxeberria (2007), Troian (2010) e Werle (2010), a capacidade de absorção de água é uma das características mais significativas dos agregados reciclados, podendo acarretar absorção de água do concreto. O incremento na resistência à compressão dos concretos com incorporação de AGRC pode estar relacionado com esta alta absorção de água do AGRC em relação ao agregado natural, influenciando a relação água/cimento ao diminuir a quantidade de água efetiva da mistura (LÓPEZ-GAYARRE *et al.*, 2009). Sendo assim, nos concretos com maiores relações água/cimento (0,53 e 0,64), a quantidade de água absorvida pelo AGRC diminui a relação água/cimento efetiva das misturas, melhorando o desempenho mecânico das mesmas.

Seguindo esta lógica, a diferença entre o traço "50% Final" e "50% Inicial" no desempenho à compressão pode ser explicado por Tam et al. (2007) e Tegguer (2012), que afirmam que a absorção de água dos agregados reciclados varia em função do meio (mistura) e do tempo de contato do material com a mistura. Estendendo este raciocínio ao caso em questão, em que os agregados no traço "50% Inicial" permaneceram mais tempo em contato com a água do que no traço "50% Final", quando os AGRC foram adicionados à pasta já formada e, ainda, estiveram em contato com o meio por menos tempo.

Foi realizada análise de variância (ANOVA) para os dados de resistência à compressão, a fim de determinar a significância do efeito dos fatores estudados (a/c, mistura e idade) sobre esta variável de resposta. Estas análises efetuadas para um nível de confiança de 95% e são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de P	Efeito significativo
a/c	1014,01	2	507,005	54,84	0,0000	Sim
mistura	104,981	2	52,4905	5,68	0,0058	Sim
idade	1239,76	2	619,882	67,05	0,0000	Sim
a/c X mistura	195,826	4	48,9566	5,30	0,0011	Sim
a/c X idade	3,3716	4	0,842901	0,09	0,9848	Não
mistura X idade	10,1857	4	2,54642	0,28	0,8926	Não
a/c X mistura X idade	36,1514	8	4,51892	0,49	0,8589	Não
Erro	499,253	54	9,24543			
Total corrigido	3103,54	80				

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada

As médias de resistência à compressão, tendo em vista os efeitos isolados dos fatores de controle e da interação que apresentaram efeito significativo sobre a propriedade em questão, são apresentados na Figura 38 à Figura 41. O efeito da relação a/c e da idade seguiram o comportamento esperado, ou seja, quanto maior a relação a/c menor é a resistência e quanto maior a idade maior é a resistência à compressão, com tendência à estabilização aos 63 dias (Figura 39). No entanto, quanto ao efeito da mistura, a tendência de comportamento é diferente daquela observada para as propriedades no estado fresco. Ou seja, conforme já discutido, a introdução do AGRC no início pelo método adotado, faz com que o AGRC tenha contato direto com a primeira adição de água, fazendo com que haja uma absorção direta da água de amassamento, antes da adição do cimento. Isto faz com que haja uma redução na relação água/cimento efetiva que o novo concreto terá. Com isto, existe a tendência de os concretos com AGRC-i tenham maior resistência.

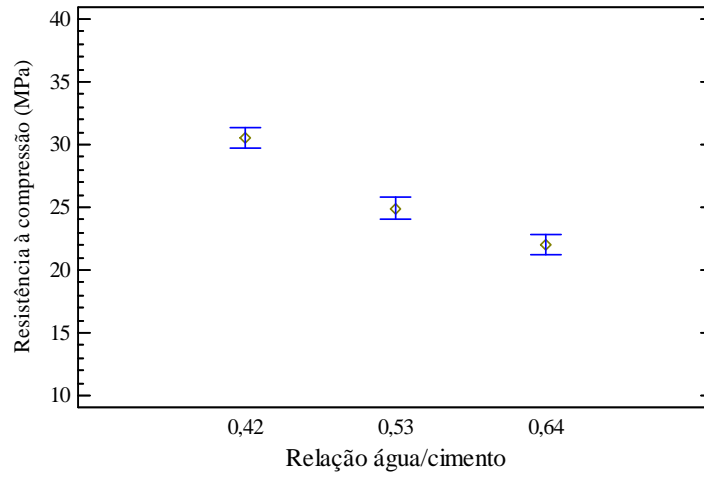


Figura 38 – Médias do efeito da relação água cimento sobre a resistência à compressão.

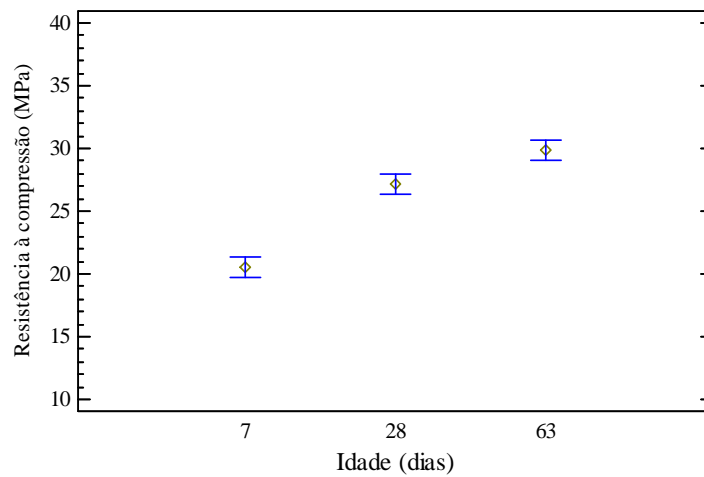


Figura 39 – Médias do efeito da idade sobre a resistência à compressão.

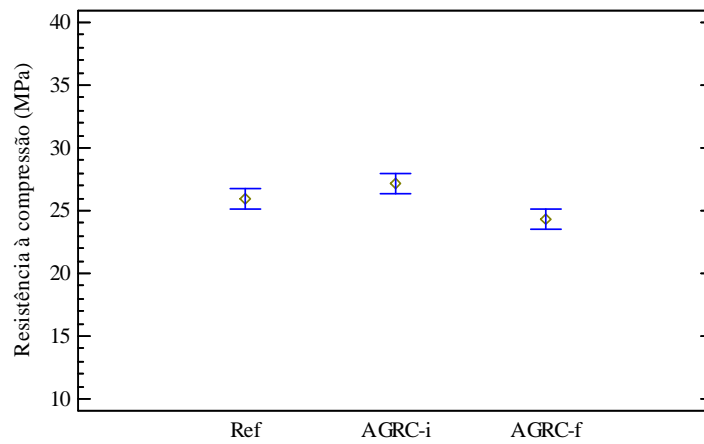


Figura 40 – Médias do efeito da mistura sobre a resistência à compressão.

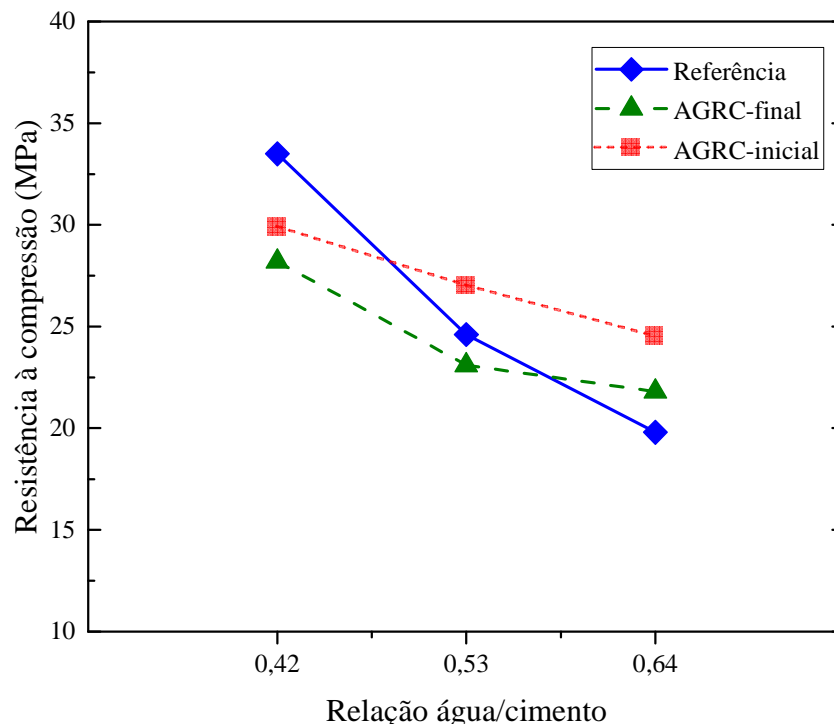


Figura 41 – Médias do efeito da interação entre relação a/c e mistura sobre a resistência à compressão.

4.2.2 Resistência à tração

Muito embora a resistência à tração por compressão diametral se demonstre uma característica mecânica secundária, esta propriedade não pode ser desprezada quando da realização de um estudo criterioso acerca das propriedades do concreto com incorporação de novos materiais (GONÇALVES, 2011). A fim de corroborar esta afirmação, seguem os gráficos da Figura 42, da Figura 43 e da Figura 44, onde serão apresentados os resultados de resistência à tração, obtidos para concretos ensaiados aos 7, 28 e 63 dias de idade, respectivamente.

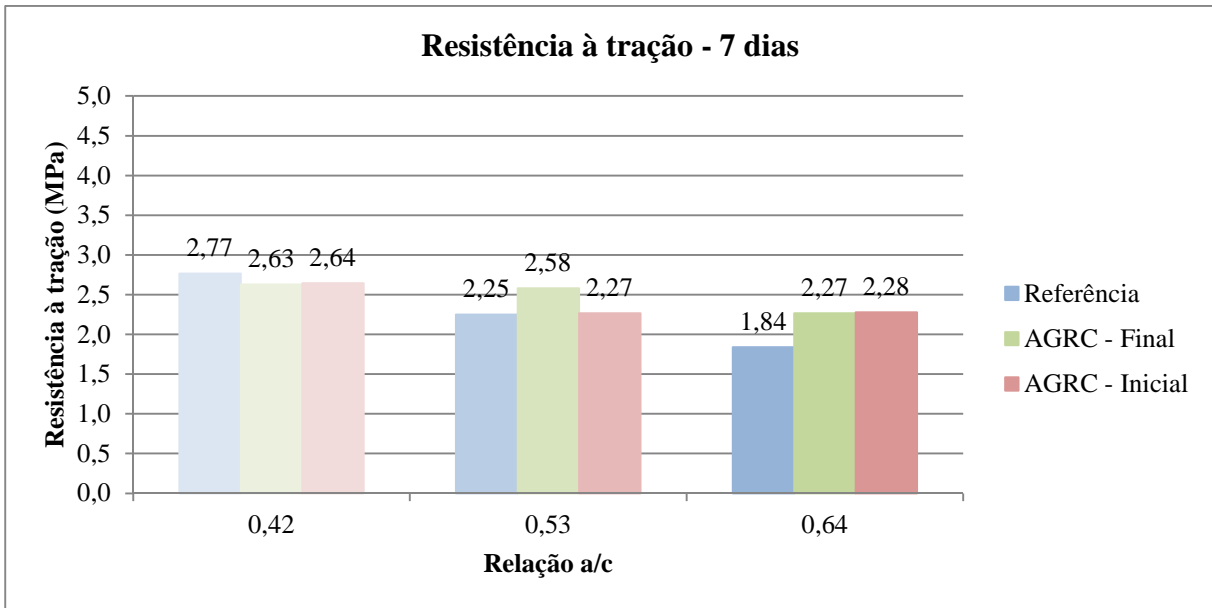


Figura 42- Resistência à tração dos concretos aos 7 dias.

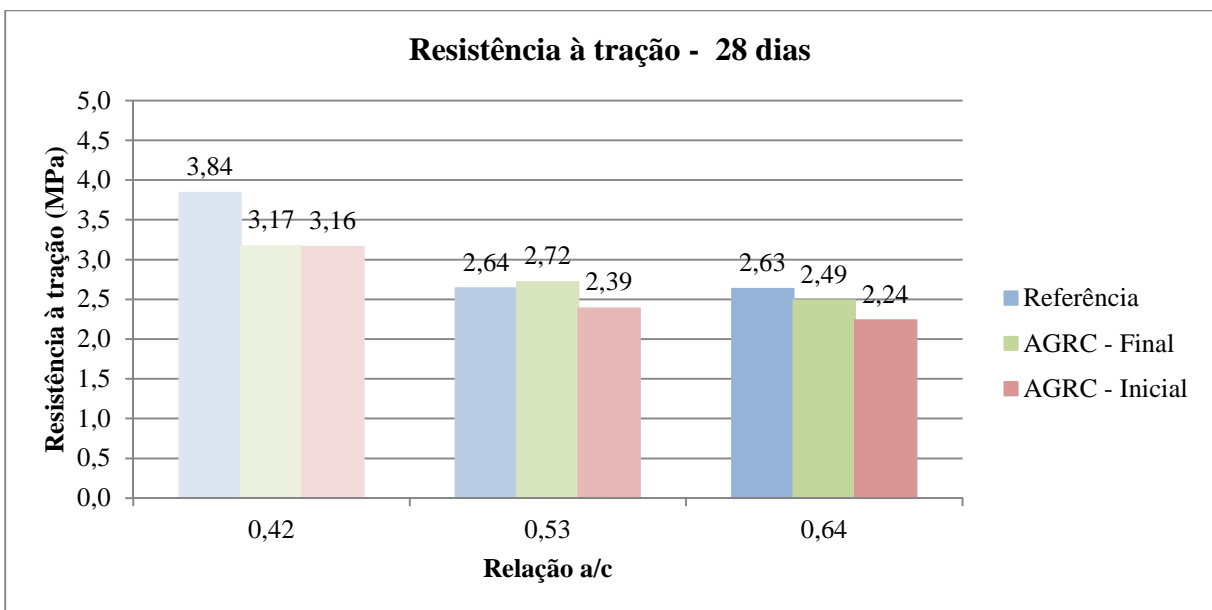


Figura 43- Resistência à tração dos concretos aos 28 dias.

Os resultados apresentados mostram que, no caso dos concretos de relação água/cimento 0,42, os resultados seguem a uma tendência semelhante aos resultados obtidos para a resistência à compressão, ou seja, as amostras de concreto com incorporação de AGRC apresentam desempenho à tração inferior às amostras de referência, em todas as idades analisadas.

Para concretos com relação água/cimento 0,53, o comportamento dos resultados varia em função da idade de rompimento do concreto. Aos 7 dias, o traço 50% Final apresenta melhor desempenho à tração, seguido do traço 50% Inicial. Aos 28 dias, a resistência à tração do traço 50% Final é superada pelo traço Referência. Por fim, quando da realização do ensaio

aos 63 dias, o traço Referência sobressai-se em relação àqueles com incorporação de AGRC que, por sua vez, apresenta melhor desempenho à tração quando da substituição por AGN no início do processo de amassamento.

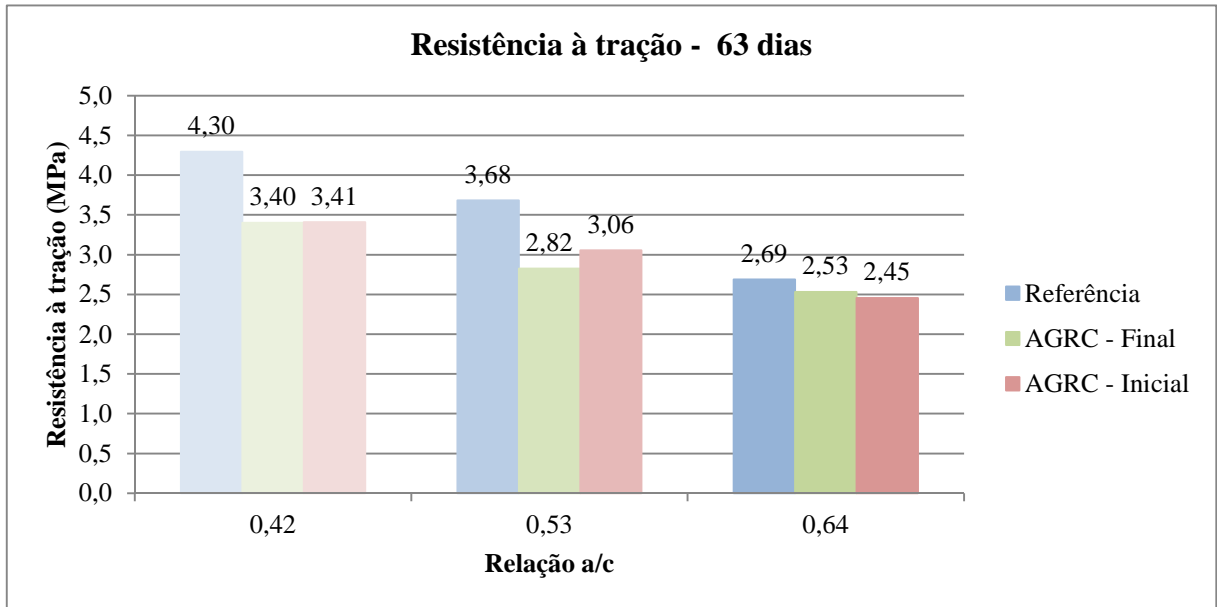


Figura 44- Resistência à tração dos concretos aos 63 dias.

Finalmente, as amostras de concreto de relação água/cimento 0,64 apresentam uma nova tendência de comportamento. Aos 7 dias, os traços com AGRC têm resistência superior ao de referência. Esta condição é alterada aos 28 dias, quando as amostras de referência superam os traços 50% Final e 50% Inicial. Aos 63 dias, as amostras do traço 50% Final seguem com desempenho à tração superior às demais amostras com AGRC, porém, ainda abaixo dos traços de referência.

Os resultados obtidos expressam uma realidade distinta em relação ao trabalho de Lovato (2007), em que todos os traços contendo agregados reciclados apresentaram diminuição na resistência à tração por compressão diametral, quando comparados com os concretos convencionais. No entanto, ainda que tenha ocorrida redução de resistência em todas as matrizes estudadas, a autora destaca a atenuação desta diminuição no desempenho à tração para os concretos com relações água/cimento mais altas. Ou seja, seguindo a lógica da autora, quanto maior a relação água/cimento menor a influência negativa da incorporação de agregados reciclados na resistência à tração, como pode ser comprovado, também, pelos resultados apresentados na Figura 42, Figura 43 e Figura 44.

A análise de variância realizadas para os resultados de resistência à tração é apresentada na Tabela 10.

As análises de variância dos resultados de resistência à tração revelam que, os fatores estudados (a/c, mistura e idade) apresentam efeito significativo sobre a resistência à tração, assim como a interação entre idade e mistura.

Tabela 10 – ANOVA dos resultados de resistência à tração.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de P	Efeito significativo
a/c	10,6402	2	5,32009	32,37	0,0000	Sim
mistura	1,3593	2	0,679649	4,13	0,0213	Sim
idade	7,77826	2	3,88913	23,66	0,0000	Sim
a/c X mistura	0,990272	4	0,247568	1,51	0,2134	Sim
a/c X idade	1,33786	4	0,334466	2,03	0,1024	Não
mistura X idade	1,9594	4	0,489849	2,98	0,0270	Sim
a/c X mistura X idade	0,488454	8	0,0610568	0,37	0,9312	Não
Erro	8,87607	54	0,164372			
Total corrigido	33,4298	80				

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada

4.2.3 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada a partir de três amostras com 28 dias de idade, de cada concreto estudado. A Tabela 11e a Figura 45, a Figura 46 e a Figura 47 apresentam as médias da absorção de água total das amostras.

Tabela 11 – Resultados de absorção de água por capilaridade.

Relação a/c - Traço		Água absorvida		
		(g)	(%)	(g/cm ²)
0,42	Ref.	14,89	6,05	0,400
	AGRC-i	18,02	7,13	0,480
	AGRC-f	17,67	7,07	0,471
0,53	Referência	16,65	6,44	0,445
	AGRC-i	18,36	7,39	0,490
	AGRC-f	17,91	7,38	0,481
0,64	Referência	17,32	6,84	0,472
	AGRC-i	18,00	7,12	0,482
	AGRC-f	18,82	7,51	0,506

A exemplo do ocorrido na avaliação das propriedades mecânicas dos concretos, a absorção de água dos concretos é diretamente afetada pela capacidade de absorção do AGRC. Conforme Buttler (2003), a qualidade do agregado reciclado é determinante para que o concreto apresente propriedades satisfatórias.

Através do gráfico da Figura 45 percebe-se que, para concretos de relação água/cimento 0,42, a maior absorção de água nas idades iniciais ocorre nas amostras de traço 50% Final. No entanto, nas medições realizadas a partir dos 1000 minutos de ensaio esta tendência modifica-se, passando as amostras do traço 50% Inicial a absorverem mais água por centímetro quadrado, seguidas das amostras dos traços 50% Final e Referência, nesta ordem.

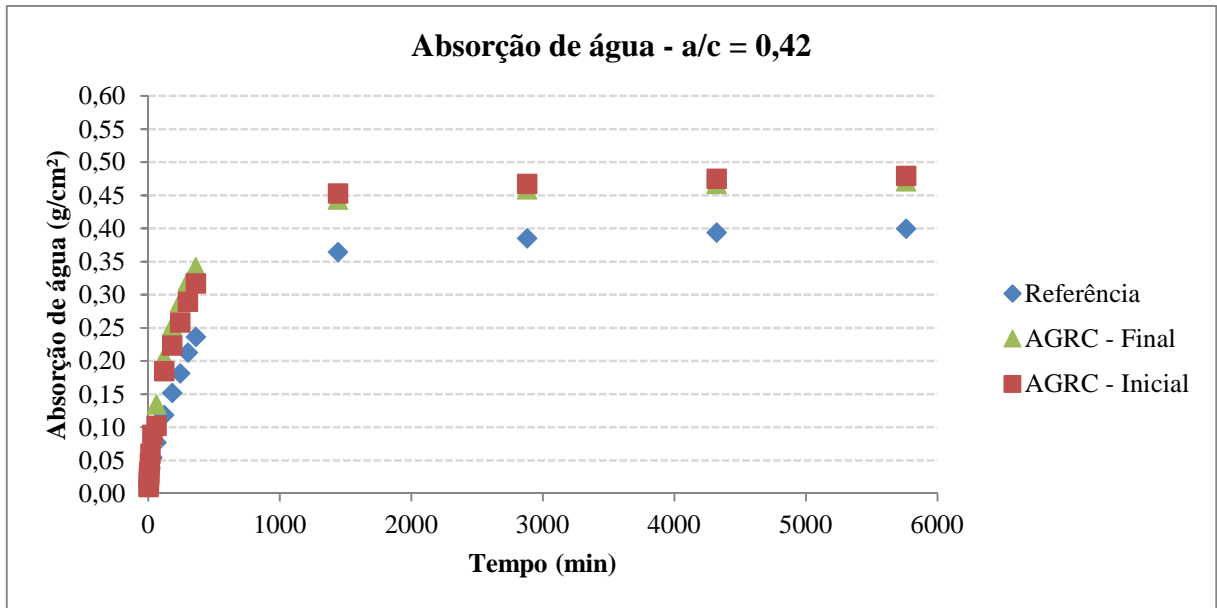


Figura 45- Absorção de água dos concretos com relação água/cimento igual a 0,42.

No caso dos concretos de relação água/cimento 0,53, o traço 50% Inicial apresenta maior absorção de água, desde as primeiras aferições. Da mesma forma, as amostras do traço 50% Final aparecem logo na sequência, seguidas pelo traço "Referência".

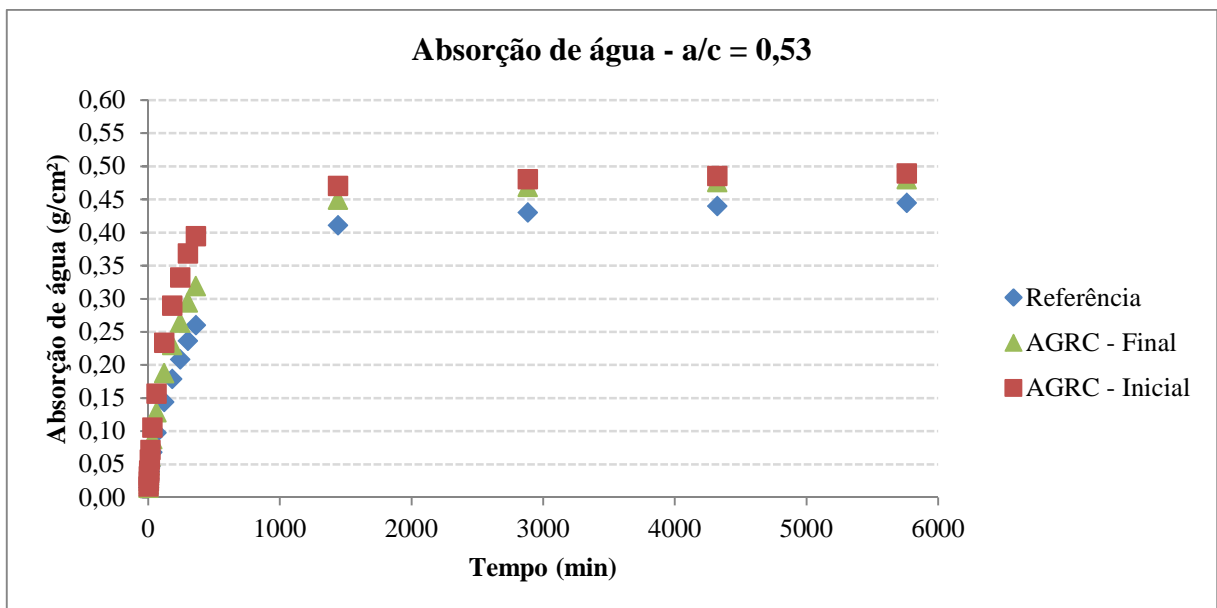


Figura 46- Absorção de água dos concretos com relação água/cimento igual a 0,53.

Já, os resultados de absorção de água dos concretos de relação água/cimento 0,64 apresentam outra tendência. Neste caso, o traço "50% Final" apresentou maior valor de absorção em todas as medições.

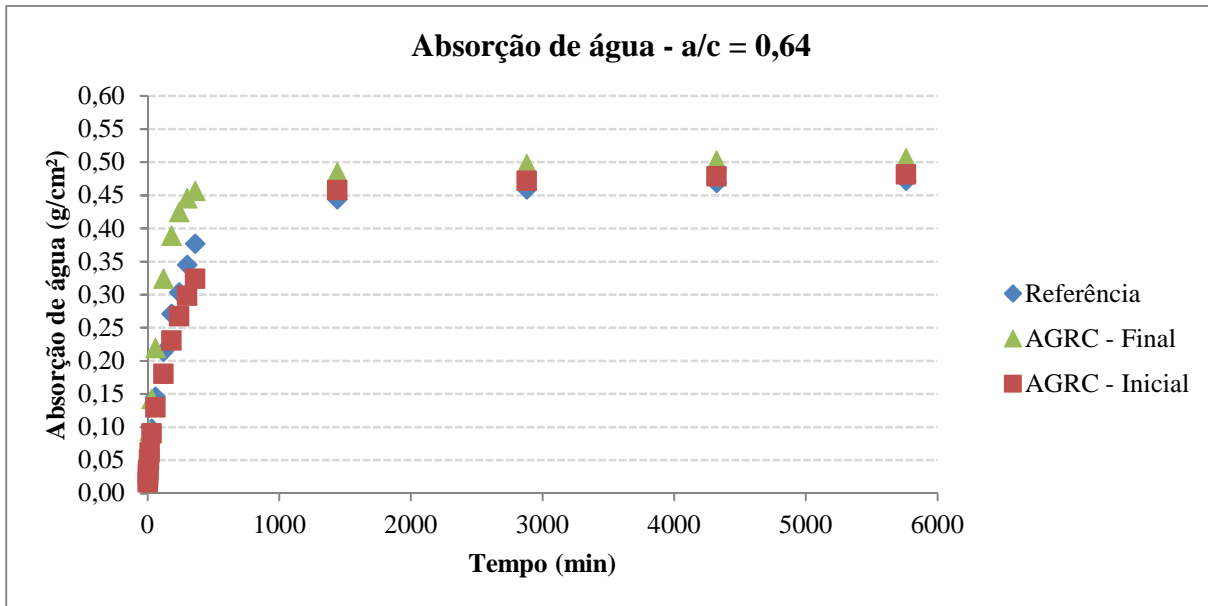


Figura 47- Absorção de água dos concretos com relação água/cimento igual a 0,64.

A

Tabela 12 apresenta os resultados da análise de variância realizada entre os resultados obtidos para os concretos de mesma relação água/cimento. Do exposto, percebe-se que há significância dos fatores estudados sobre a absorção total de água.

Tabela 12 – ANOVA dos resultados de absorção de água.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de P	Efeito significativo
a/c	10,6402	2	5,32009	32,37	0,0000	Sim
mistura	1,3593	2	0,679649	4,13	0,0213	Sim
idade	7,77826	2	3,88913	23,66	0,0000	Sim
a/c X mistura	0,990272	4	0,247568	1,51	0,2134	Sim
a/c X idade	1,33786	4	0,334466	2,03	0,1024	Não
mistura X idade	1,9594	4	0,489849	2,98	0,0270	Sim
a/c X mistura X idade	0,488454	8	0,0610568	0,37	0,9312	Não
Erro	8,87607	54	0,164372			
Total corrigido	33,4298	80				

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada

4.2.4 Resistividade elétrica do concreto endurecido

Os resultados de resistividade elétrica estão no Apêndice (Tabela(A) 1) e as médias dos resultados em U.R. 100% são apresentados da Figura 48 a Figura 51.

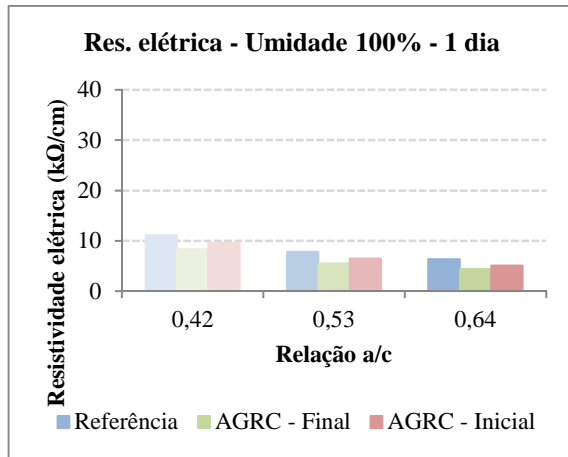


Figura 48- Resistividade elétrica dos concretos à 1 dia, com umidade a 100%.

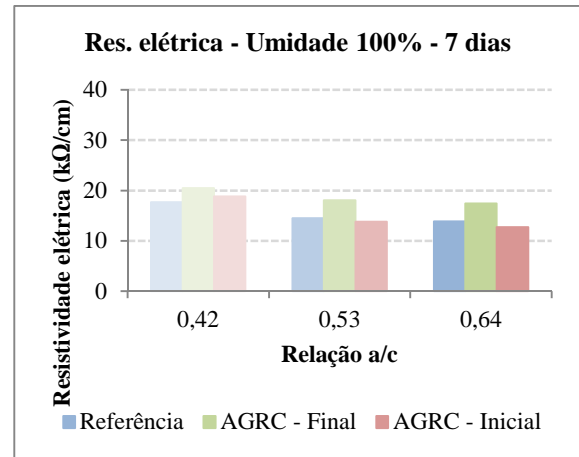


Figura 49- Resistividade elétrica dos concretos aos 7 dias, com umidade a 100%.

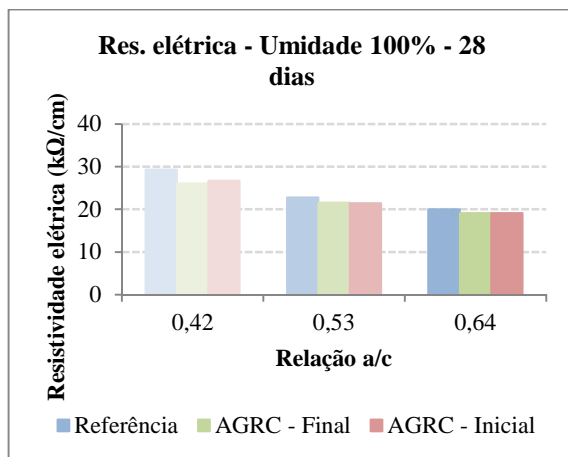


Figura 50- Resistividade elétrica dos concretos aos 28 dias, com umidade a 100%.

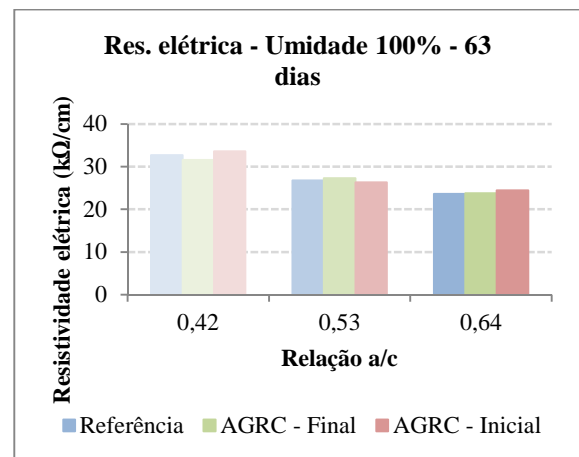


Figura 51- Resistividade elétrica dos concretos aos 63 dias, com umidade a 100%.

Analisando os valores apresentados de resistividade elétrica para a U.R. 100%, de modo geral observa-se que quanto menor a relação a/c, maior a resistividade elétrica das amostras analisadas, como esperado. É visível também o aumento da resistividade elétrica com o avanço da idade dos concretos, na ordem de duas vezes comparando-se 1 com 28 dias e 3 vezes comparando-se 1 e 63 dias. No entanto, o aumento entre 28 e 63 dias é de apenas 21%. Assim como na amostra referência, onde o aumento da resistividade elétrica se mantém gradativa, os outros concretos também evidenciam uma resistividade crescente com o tempo de cura. Até aos sete dias, a resistividade elétrica não apresenta uma variação relevante entre os diferentes traços, contudo a partir desta idade, as amostras produzidas com inserção de AGCR, demonstram equivaler ou até mesmo, acentuar a resistividade elétrica em relação ao referência.

Da Figura 52 à Figura 55 apresentam-se os dados de resistividade elétrica no estado endurecido para a U.R. 70%.

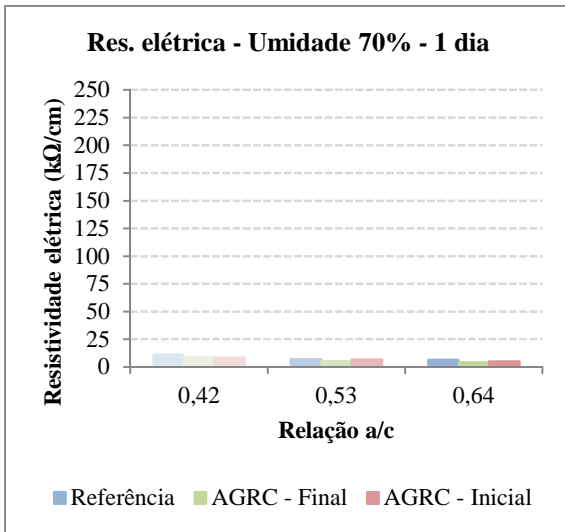


Figura 52 - Resistividade elétrica dos concretos à 1 dia, com umidade a 70%.

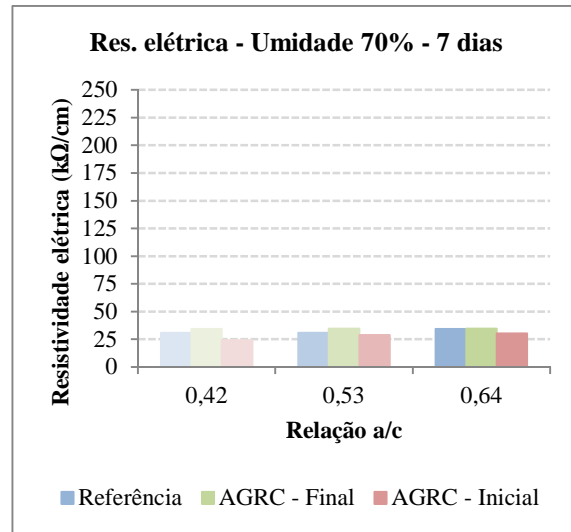


Figura 53- Resistividade elétrica dos concretos aos 7 dias, com umidade a 70%.

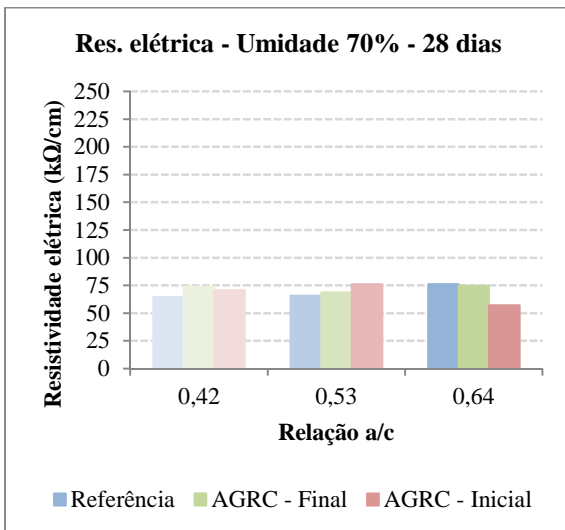


Figura 54 - Resistividade elétrica dos concretos aos 28 dias, com umidade a 70%

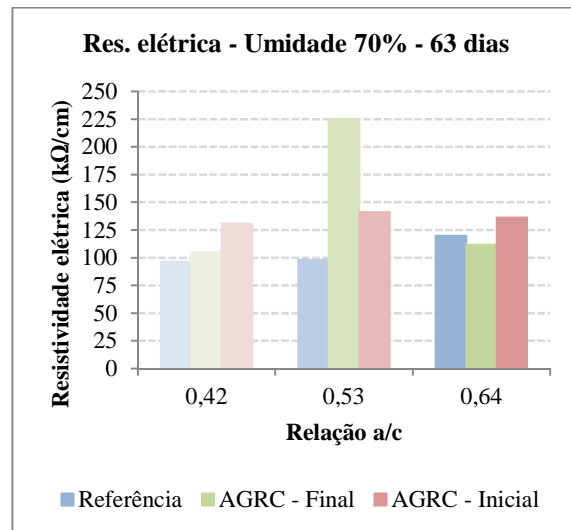


Figura 55- Resistividade elétrica dos concretos aos 63 dias, com umidade a 70%.

A análise dos valores apresentados da Figura 52 a Figura 55, onde o condicionante de umidade do ambiente de cura foi de 70%, a relação água/cimento parece não se mostrar relevante na variação de resistividade elétrica nas amostras e idades estudadas. Contudo, se forem tomados os dados de 28 dias, obteve-se, respectivamente, para a/c 0,42; 0,53 e 0,64 resistividades de 65, 66 e 76 kΩ.cm, ou seja, não há variação significativa para as relações a/c mais baixas, mas a resistividade aumenta para a relação a/c 0,64. Este comportamento é contrário ao esperado, onde a maior relação a/c apresenta maior porosidade e menor resistividade. Comprovando esta afirmação, pode-se citar o estudo realizado em concretos convencionais, com relações água/cimento 0,31; 0,42 e 0,53, onde Jordani et al. (2015), expondo os corpos de prova à umidade relativa de 60%, encontraram comportamento resistividades elétricas de 55, 50 e 45 kΩ.cm, respectivamente para as relações a/c citadas.

Possivelmente o comportamento observado no estudo desta dissertação possa ser atribuído à variabilidade do experimento.

Para todos os concretos, a resistividade elétrica aumenta com a idade do concreto. Assim como a amostra referência, onde o aumento da resistividade elétrica ocorre gradativamente ao longo do tempo, as restantes também evidenciam uma resistividade crescente com o tempo de cura. Até aos 28 dias, a resistividade elétrica não apresenta diferença relevante entre os traços, contudo a partir desta idade, as amostras produzidas com inserção de AGCR, demonstram aumentar a resistividade elétrica em relação ao concreto referência.

Desta forma, levando em consideração os resultados apresentados pelas amostras, cabe destacar as colocações de Enevoldsen (1994), que observa que o volume de água no concreto é resultado natural da relação de fatores como água/cimento, umidade relativa do ar, porosidade, entre outros. Segundo o autor, é possível tomar como exemplo a umidade relativa do ar, que é fator crucial para o grau de saturação dos poros, controlador da resistividade elétrica do concreto de cobertura. Quanto mais saturados estiverem os poros de concreto, mais baixa será a resistividade elétrica.

4.3 RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados em concreto no estado endurecido foram elaborados gráficos com relações lineares entre os mesmos. Para cada regressão serão apresentados os valores do coeficiente de determinação R^2 , que indica o quanto a equação ajustada reproduz os valores experimentais. Nesta etapa do trabalho serão apresentadas e discutidas estas regressões.

4.3.1 Resistência à compressão x Resistência à tração

A seguir, serão apresentadas as relações entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração, para amostras ensaiadas aos 7, 28 e 63 dias de idade. Estas relações serão feitas a partir dos resultados de um mesmo traço ("Referência", "50% Inicial" ou "50% Final"), variando-se a relação água/cimento dos concretos.

A Figura 56 apresenta o gráfico que relaciona os valores obtidos de resistência à compressão com os resultados de resistência à tração, ambos para amostras com 7 dias de idade. Do exposto, percebe-se que há forte linearidade entre os resultados dos concretos do

traço "Referência" e que, entre os traços com incorporação de AGRC não há linearidade significativa.

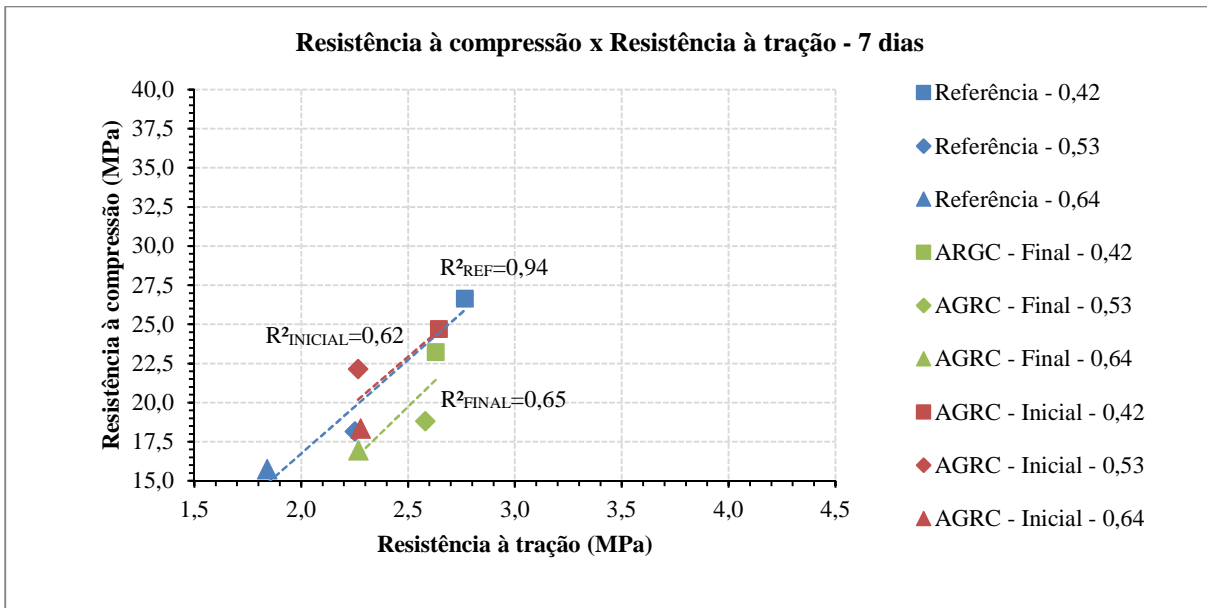


Figura 56- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração, aos 7 dias.

Para as amostras com 28 dias de idade (Figura 57), vê-se que há linearidade entre as relações dos traços "Referência" e "50% Final". Neste caso, apenas as amostras do traço "50% Inicial" não expressam linearidade entre resistência à compressão e resistência à tração. Aos 63 dias de idade (Figura 58), os resultados apresentam boa linearidade, novamente, para as amostras dos traços "Referência" e "50% Final". No entanto, neste caso, as amostras do traço "50% Inicial" apresentaram grau de linearidade, ainda que seja considerado baixo.

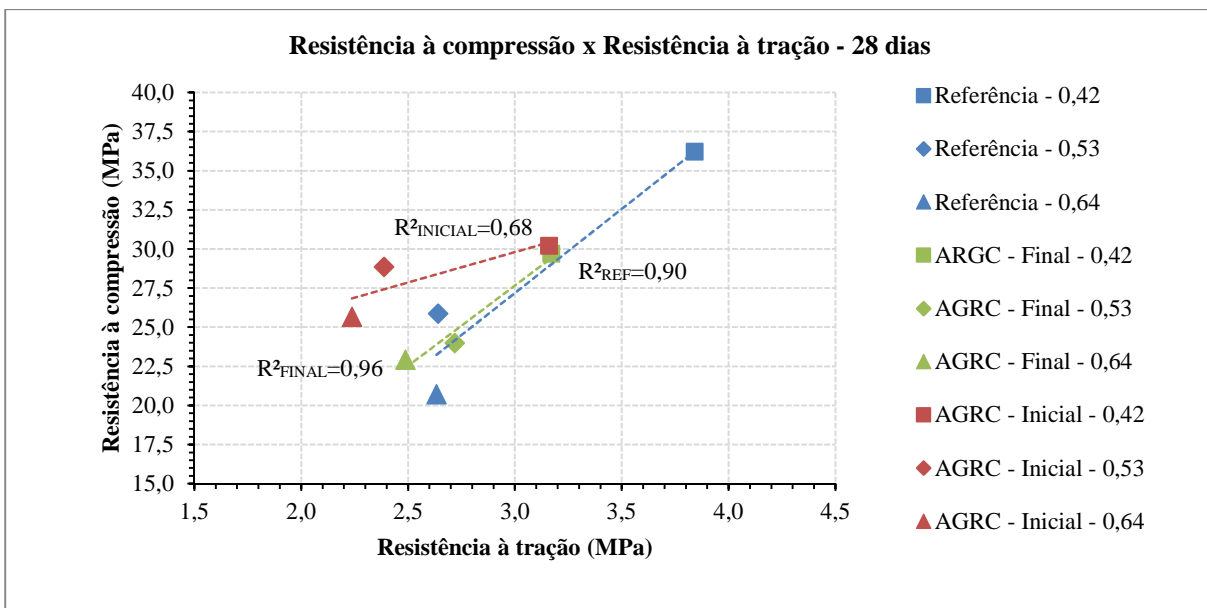


Figura 57- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração, aos 28 dias.

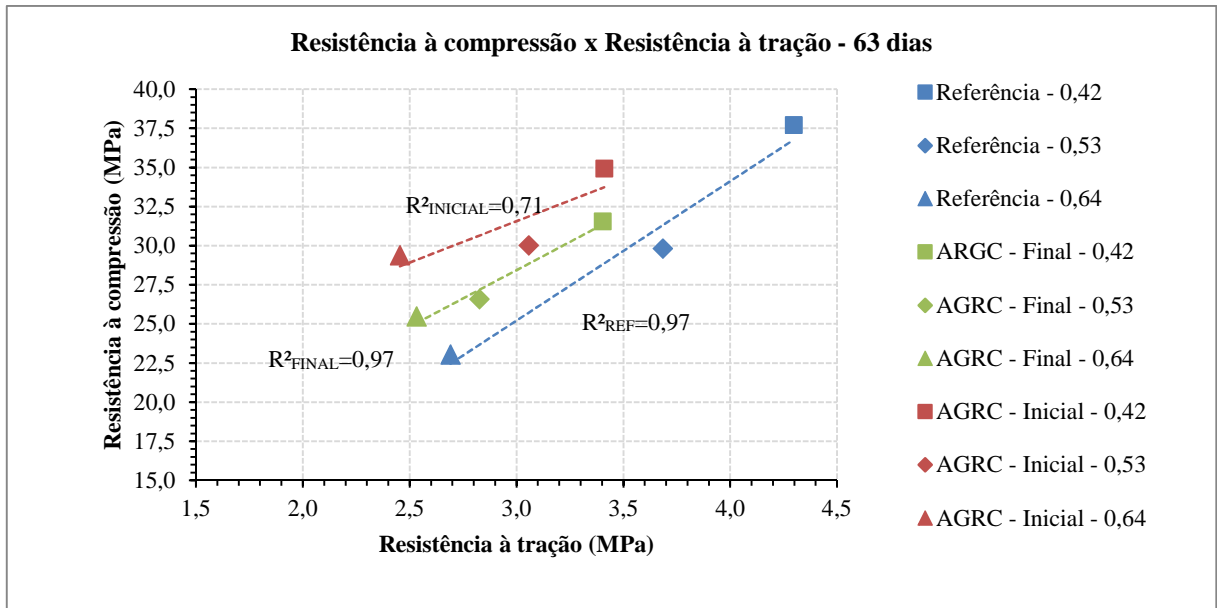


Figura 58- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração, aos 63 dias.

4.3.2 Resistência à compressão x Absorção de água

Os resultados entre resistência à compressão e absorção de água também foram relacionados, como pode ser visto no gráfico da Figura 59. Tendo em vista que o ensaio de absorção de água foi realizado com amostras aos 28 dias de idade, para obter a relação entre estas propriedades foram considerados os resultados de resistência à compressão para a mesma idade. Dos valores de R^2 pode-se afirmar que há uma relação muito forte entre os resultados de resistência à compressão e absorção de água para os traços "Referência".

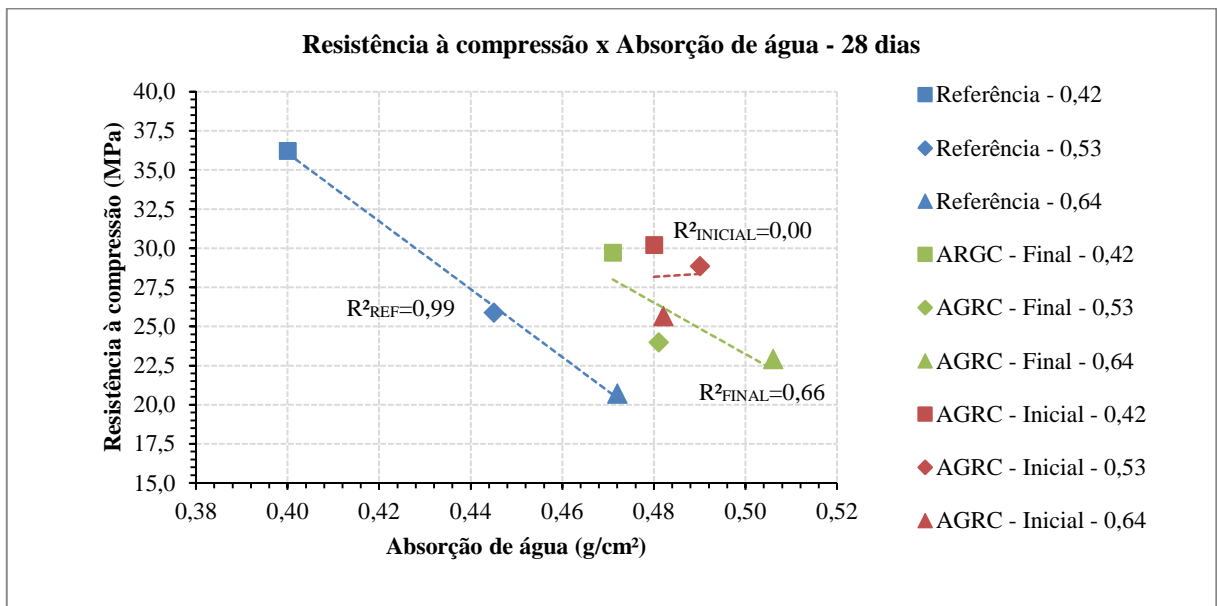


Figura 59- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e absorção de água, aos 28 dias.

4.3.3 Resistência à compressão x Resistividade Elétrica

As relações entre resistência à compressão e resistividade elétrica também foram estabelecidas. A seguir, são apresentados os gráficos com os respectivos valores de R^2 para cada uma destas relações, considerando que os resultados de resistência à compressão são relacionados com a resistividade elétrica para cada idade de ensaio (7, 28 e 63 dias) e para cada condição de umidade de ambiente de ensaio da resistividade elétrica (100% e 70%). A Figura 60, a Figura 61 e a Figura 62 apresentam as relações entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica aos 7, 28 e 63 dias, respectivamente, para um ambiente com umidade de 100% quando da realização do ensaio de resistividade.

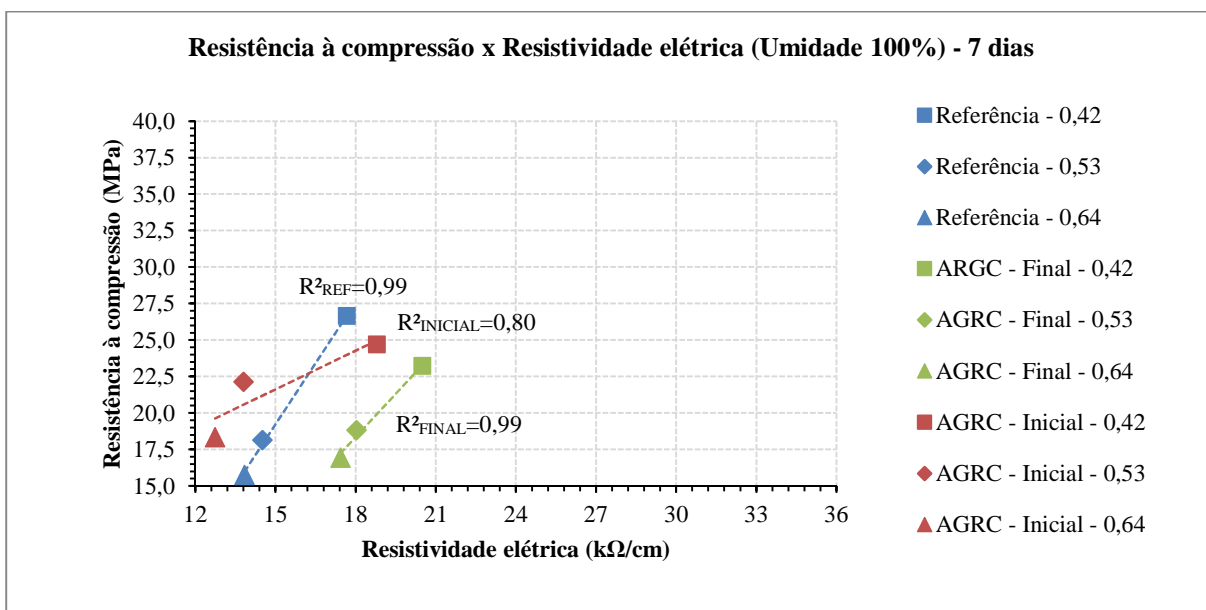


Figura 60- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 100%, aos 7 dias.

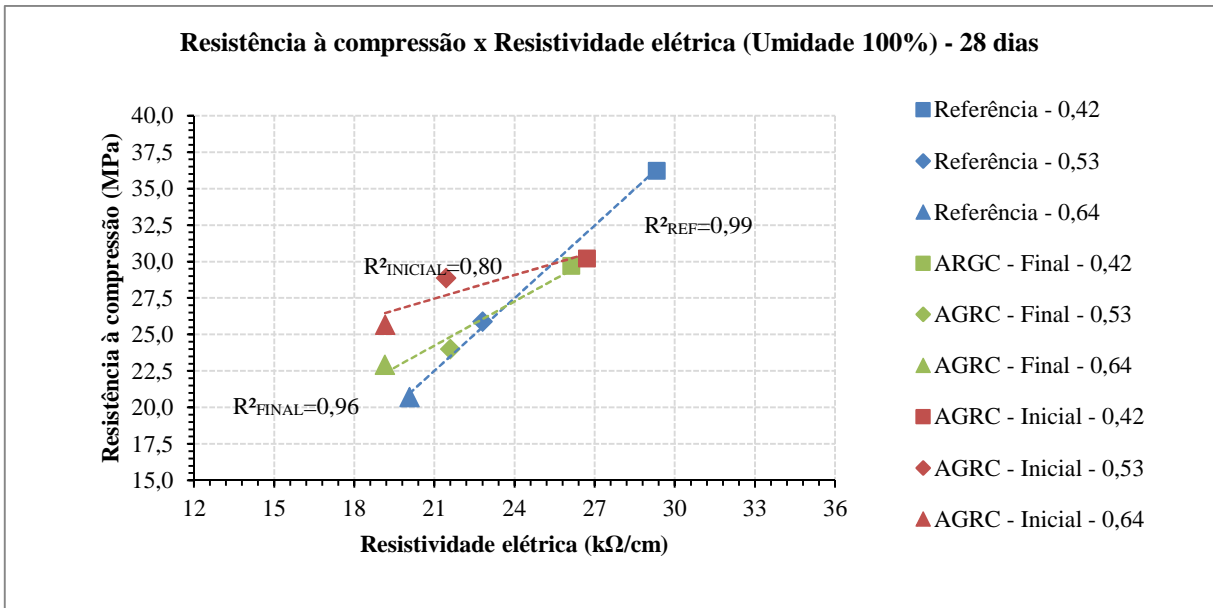


Figura 61- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 100%, aos 28 dias.

O ajuste das retas evidencia fortes relações lineares entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica, de amostras aos 7 e 28 dias, para os traços "Referência" e "50% Final". Os resultados para o traço "50% Inicial" também apresentaram relação linear, ainda que não seja tão expressiva como as demais.

Aos 63 dias, as relações entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica, para os três traços, apresentam bom nível de linearidade, como comprovado pelo gráfico da Figura 62.

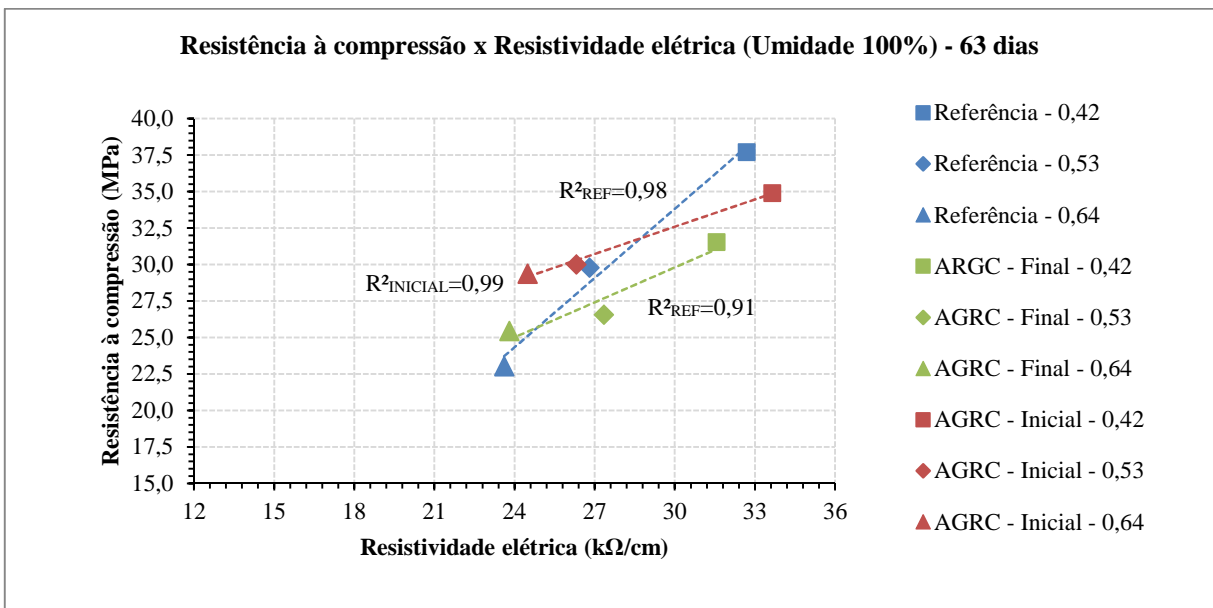


Figura 62- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 100%, aos 63 dias.

As relações entre os resultados de resistividade elétrica, obtidos em ambiente com umidade a 70%, e resistência à compressão, são apresentados nos gráficos da Figura 63, da Figura 64 e da Figura 65, para amostras com 7, 28 e 63 dias, respectivamente.

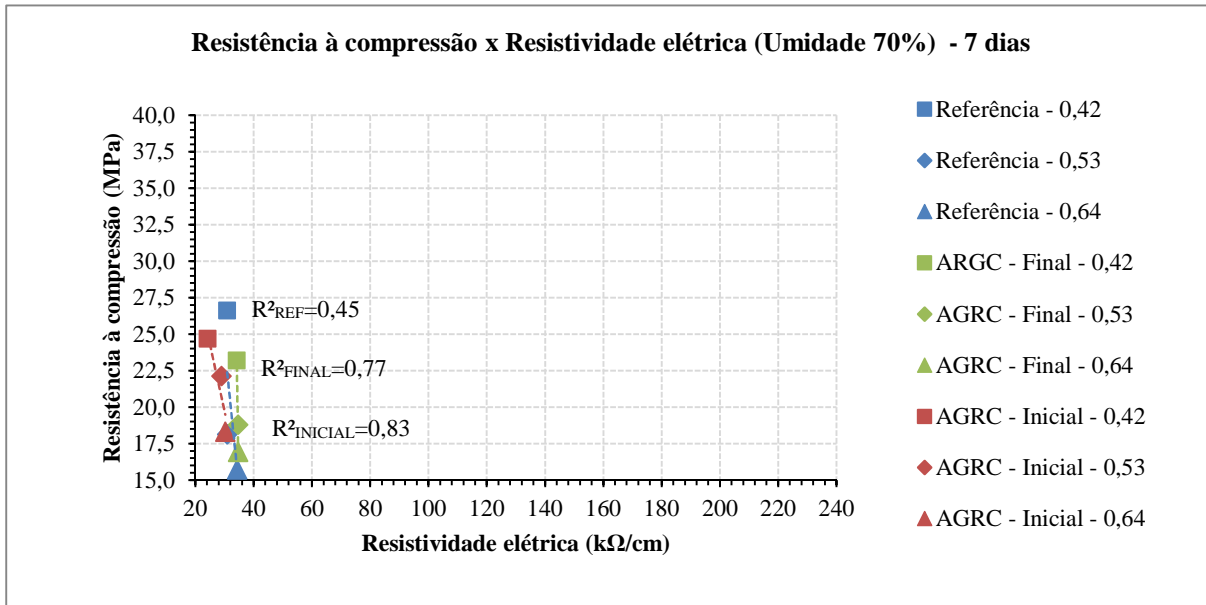


Figura 63- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 70%, aos 7 dias.

Das relações estabelecidas para amostras aos 7 dias, a única que apresenta alguma linearidade é a relação entre os resultados do traço "50% Inicial". Os demais traços não apresentam linearidade significativa.

Aos 28 dias, todos os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica não apresentam qualquer linearidade, a exemplo do que ocorre com os resultados dos traços "50% Inicial" e "50% Final" aos 63 dias. Para esta mesma idade, os resultados do traço "Referência" apresentam baixa linearidade.

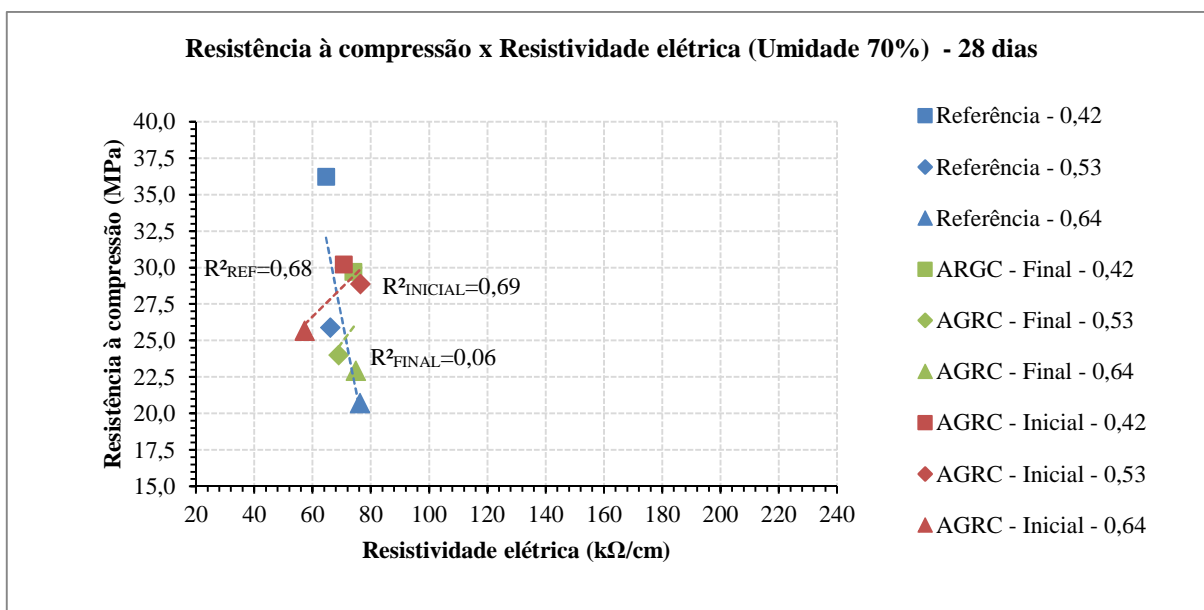


Figura 64- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 70%, aos 28 dias.

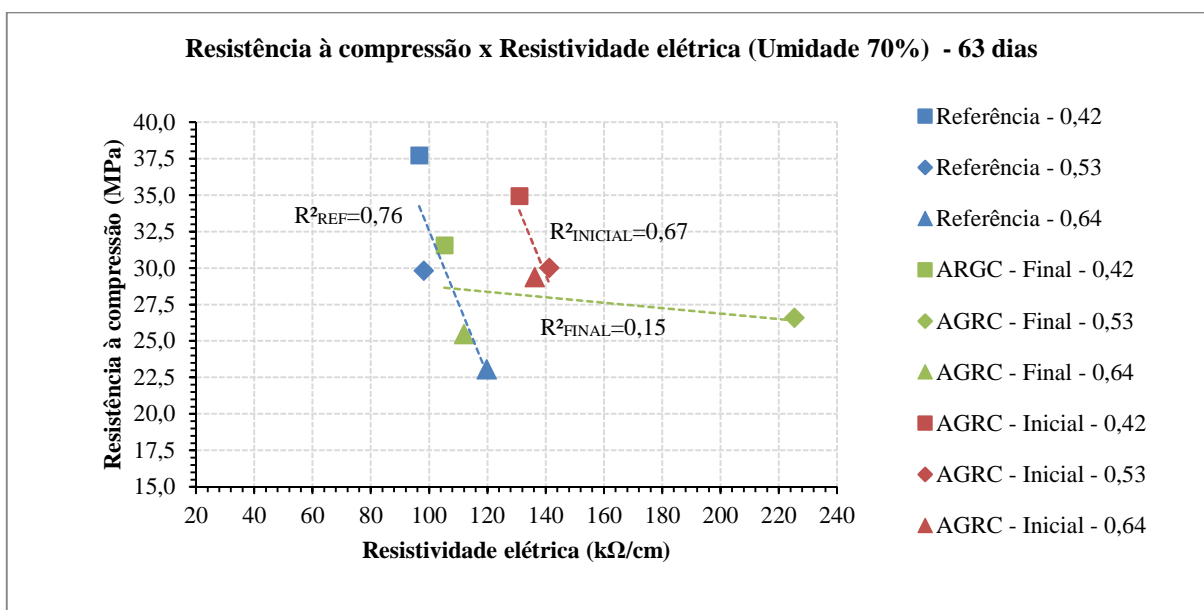


Figura 65- Relação linear entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica em ambiente com umidade a 70%, aos 63 dias.

Ao se comparar as três situações de umidade é possível verificar que a resistência à compressão apresenta uma boa correlação com a resistividade elétrica, podendo esta última ser um indicativo da primeira. Este comportamento foi observado em todas as idades. No entanto, na umidade de 70% a boa correlação só pode ser observada nas idades maiores e também somente para as misturas referências e com o agregado introduzido no início da mistura.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo que finaliza o trabalho serão apresentadas as considerações finais acerca dos objetivos propostos, com base na revisão bibliográfica e no programa experimental desenvolvido, bem como sugestões de trabalhos futuros.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliando a influência do método de mistura de concretos com agregado graúdo de concreto reciclado (AGRC) nas propriedades no estado fresco e no estado endurecido, tendo em vista as delimitações definidas neste trabalho, seguem as conclusões finais:

- Inserir o AGRC ao final da mistura, resulta em abatimentos maiores do que quando ele é introduzido no início da mistura. Ou seja, mostra uma menor absorção de água por parte do AGRC;
- Com relação à resistividade elétrica no estado fresco, verificou-se que os traços com incorporação de AGRC, principalmente ao final da mistura, obtiveram valores próximos aos traços "Referência";
- Em relação aos resultados de resistência à compressão, os valores apresentados equivalem-se. Porém existe a tendência dos concretos com AGRC-i possuírem maior resistência, devido à redução na relação água/cimento efetiva que o novo concreto terá;
- Sobre a resistência à tração pode-se dizer que o comportamento dos concretos foi semelhante à resistência à compressão;
- Quanto à absorção de água por capilaridade dos concretos, de forma geral, as maiores absorções foram dos traços "50% Inicial";
- Com relação à resistividade elétrica no estado endurecido, os traços com incorporação de AGRC obtiveram valores equivalentes;

Com relação à avaliação da linearidade das relações entre os ensaios realizados com concreto no estado endurecido, os resultados obtidos através das análises estatísticas mostram que:

- Em linhas gerais, existe boa linearidade entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração dos traços "Referência" e "50% Final";

- A relação entre resistência à compressão e absorção de água somente desenvolveu linearidade para os resultados do traço "Referência";
- Entre os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica, para ambiente com umidade a 100%, houve boa relação linear entre todos os traços, principalmente, para "Referência" e "50% Final". Para as amostras ensaiadas à resistividade elétrica em ambiente com umidade a 70%, as relações com os resultados de resistência à compressão não expressaram qualquer linearidade, salvo para as amostras do traço "50% Inicial" ensaiadas aos 7 dias de idade.

Do exposto, percebe-se que, de fato, a ordem de incorporação de AGRC em substituição à 50% de AGN, afeta nas principais propriedades do concreto.

Cabe ressaltar que a incorporação de AGRC na mistura em substituição à 50% de AGN surtiu de forma geral, efeitos positivos para a maioria das propriedades estudadas quando inseridos ao final da mistura.

Esta condição pode ser mais um indicativo favorável à promoção da utilização de agregados reciclados em substituição à frações de agregados naturais em matrizes cimentícias.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir do desenvolvimento deste trabalho são sugeridas outras frentes de pesquisa relacionados com a incorporação de agregados graúdos reciclados em substituição á agregados naturais nos concretos. Dentre as questões mais relevantes que possam motivar novos estudos, elencam-se as seguintes sugestões:

- Caracterizar a microestrutura dos concretos, levando-se em consideração a ação conjunta da inserção de AGRC e pigmentos à base de cobalto;
- Verificar as propriedades mecânicas estudadas em concretos com AGRC carbonatado, com ênfase na observação da taxa de absorção de água e a porosidade dos concretos analisados;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. G., **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Porto Alegre. 1998. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

AMORIM, P. M. E. **Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão**. 2008. 173f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Lisboa. 2008.

ÂNGULO, S. C. et al. **Tratamento térmico e moagem de resíduos de concreto com diferentes classes de resistências**. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO - ENARC, 3., 2013, São Leopoldo. **Anais eletrônicos...** Porto Alegre: ANTAC, 2013.

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

ARCHIE, G. E. The Electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. **AIME Transactions**, [S.l.], v. 146, p. 54-62, 1942.

ARNOLD, D.C.M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 2011. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2011.

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

BARRA, M. **Estúdio de ladurabilidaddelhormigón de árido reciclado em sua aplicación como hormigón armado**. 1996. 223f. Tese (Doutorado), Universidade Politècnica da Catalunya, Barcelona, 1996.

BARROW, G. M. **Química Física**. Barcelona: Reverté, 1964.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BELIN, P., HABERT, G., THIÉRY M., ROUSSEL N. Improvement of recycled concrete aggregates properties by carbonation. 2012. Gothenburg, SW. In: 8th International conference on Sustainable management of waste and recycled materials in construction - WASCON 2012 - towards effective, durable and sustainable production and use of alternative materials in construction. **Proceedings....** ISCOWA – SGI: Gothenburg. 2012. 1v. 4p.

BENETTI, J.K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2012.

BOGGIO, A. J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

BRAMESHUBER, W.; RAUPACH, M. Non-destructive determination of the watercontent in the concrete cover using the multiring-electrode. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING (NDT-CE). Berlin, September 16-19, 2003. **Electronic Proceedings...** Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/p041/p041.htm>>. Acesso em: 13/03/2015.

BRAUN, C.E. **Determinação instantânea da relação água-cimento e da resistência à compressão do concreto no estado fresco através do método da resistividade elétrica**. São Leopoldo, 2015. 182 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

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

BUEST NETO, T. G. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. 2006. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós--Graduação em Construção Civil, UFPR, Curitiba. 2006.

BUTTLE, 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 - USP, São Carlos, SP, 2003.

BUTTLE, A. M.; CORRÊA, M. R. S.; PRADO, D. M.; RAMALHO, M. A. Avaliação das propriedades de agregados reciclados de concreto gerados em uma fábrica de pré-moldados. *Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil*, 2006.

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

CASCUDO, O; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto In: ISASIA, G.C. (Ed.) **Concreto ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon. V.1, cap 24. 2011.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia: Ed. UFG, 1997.

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, p. 515 – 525, 2009.

CASTRO, A. L.; LIBÓRIO, J. B. L. **Considerações sobre o processo de produção de concreto de alto desempenho para estruturas pré moldadas**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Pré Moldados, São Carlos, 2005.

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

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. 2014. Disponível em: <http://www.cbic.org.br>, acesso em: 15 de novembro de 2014.

CDIAC – CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER. **Global Fossil-Fue CO₂ Emissions**. 2011. Disponível em: http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob_2008.html >. Acesso em: 13 Abr. 2014.

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

CECCONELLO, V. ; FEDUMENTI, M.B.; SARTORI, B.R.C; KULAKOWSKI, M.P. ; KAZMIERCZAK, C.S. . Efeito do uso de cinza de casca de arroz na absorção de água e resistência de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2014, Guimarães. **Anais ...** Guimarães: Universidade do Minho, 2014. v. 1. p. 427-437.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON - CEB. **Diagnosis and assessment of concrete structures: state-of-the-art report**. Lausanne, 1988. (Bulletin d'Information, 192).

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.

CHEN, H.; YEN, TSONG; CHEN K. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cementand concrete research**. V. 33, pp. 125-132, 2003.

CONAMA (2002) – Conselho Nacional do Meio Ambiente – **Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002**. [http : //www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html). Acesso em 13 de abril de 2014.

CUNHA, Q. C. A; HELENE, L. R. P. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. BT/PCC/283. ISSN 0103-9830. São Paulo, 2001.

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

ENEVOLDSEN, J. N.; HANSSON, C. M. e HOPE, B. B. The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion of steel embedded in concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 7. p. 1373-1382, 1994.

ETXEBERRIA, M. et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2007.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, v. 58, n. 10, p. 683-690, 2006.

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

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

FERREIRA, L. M. M. **Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão**. Influência da pré-saturação, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

FIGUEIREDO, E. P. Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto. In: ISAIA, G.C. 9Ed.) **Concreto**. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: Ibracon, V.2.

FLÔRES, E. O. **Equipamento para estimativa da força de compressão do concreto através da medição da resistividade**. 2014. 71 f. Monografia (Graduação) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2014.

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.

FRÖHLICH, J.; HENTGES, T.I; KULAKOWSKI, M.P. Emprego de agregados graúdos reciclados de concreto carbonatado como proposta de melhoria da eficiência de concretos. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2014, Guimarães. **Anais ...** Guimarães: Universidade do Minho, 2014. v. 3. p. 73-80.

GASPARI, M. M. **Determinação instantânea da relação água/cimento através do método da resistividade elétrica em concretos no estado fresco**. 2013. 65 f. Monografia (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.

GOMES, P.C.C; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concretos auto-adensáveis de alta resistência com aditivos minerais. In: Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 5., 2003. **Anais eletrônicos...**São Paulo: EPUSP.

GOMES, P.C.C; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; TENÓRIO, J.J.L. Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Vitória, 45., 2003. **Anais eletrônicos...** São Paulo, Ibracon, 2003b.

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. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2011.

GRIGOLI, A.S. Management in the production and utilization of the waste material in the construction site. In: CIB Symposium on construction & environment: theory into practice. Global **Anais...** São Paulo: Seven EditoraLtda., 2000.

HAMMAD, A. H. **Evaluation of soil-cement properties with electrical resistivity.**Halifax, 2013. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas) -- DalhousieUniversity, Halifax, Nova Scotia, 2013.

HANSEN, T. – **Recycling of demolished concrete and masonry.** Report of technical committee 37-DRC, Demolition and Reuse of Concrete, Taylor & Francis, London.1992.

HEINECK, S. **Desempenho de argamassas de revestimento com incorporação da fração miúda da britagem de concreto.** 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2012.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** Ed. G. C. Isaia - São Paulo: IBRACON, 2007.

HELENE, P. R. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo: Pini: Instituto de pesquisas tecnológicas, 1986.

HENDRICKS, C.; XING, W. Quality improvements of granular wastes by separation techniques. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES. **Anais...** Espanha, 2004. p. 142-149.

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

JOHN, V. M.; ANGULO, S. C. **Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos**. Em: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Porto Alegre: ANTAC, 2003. – (Coleção Habitare, v. 4). p. 9-71.

JORDANI, B; SOUZA, R; DAUT, J.; KULAKOWSKI, M.P.; MANCIO, M. Influência da geometria do corpo de prova no ensaio de resistividade elétrica em concreto. In: Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas, 11, São Leopoldo. **Anais eletrônicos...** São Leopoldo: Unisino. 2015. No prelo.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. In: **Use of Recycled Materials in Buildings and Structures**, RILEM Publications, RILEM, Barcelona, pp. 545-553. 2004

KULAKOWSKI, M. P.; FEDUMENTI, M.B.; KAZMIERCZAK, C.S.; MANCIO, M. Evaluation of chloride ion penetration methods in concrete with recycled concrete aggregate and rice husk ash. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 13., 2014, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: EPUSP, 2014. p. 702-719.

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.

KOU, S.C.; POON, C.S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarserecycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69–76, 2012.

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

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cementand Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 1975–1980, 2004.

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

LIMA, J. A. R. de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. Mestrado (Dissertação). São Carlos, 1999. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

LÓPEZ-GAYARRE, F. et al. Assessment of properties of recycled concrete by means of a highly fractioned factorial design of experiment. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 3802–3809, 2011.

LOPEZ-GAYARRE, F. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. **Waste Management**, v.29 n.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**. Porto Alegre, 2007. 180p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MANCIO, M.; MOORE, J. R.; BROOKS, Z.; MONTEIRO, P. J. M., GLASER, S. D. Instantaneous In-Situ Determination of Water-Cement Ratio of Fresh Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 107, n. 6, p. 586-592, Nov.-Dec. 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MILLARD, S. G.; HARRISON, J.A e EDWARDS, A J. Measurements of the electrical resistivity of reinforcement concrete structures for the assessment of corrosion risk. **British Journal of NDT**, v. 31, n. 11, p. 617-621, nov. 1989.

MONFORE, G. E. The electrical resistivity of concrete. **Journal of the PCA Research and Development Laboratories**, v. 10, n. 2, p. 35-48, maio, 1968.

MORRISON, H. F. **The Berkeley course in applied geophysics**. University of California, Berkeley, Berkeley, CA, 2004. Disponível em <<http://appliedgeophysics.lbl.gov>>. Acesso em: 23 jan. 2014.

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 resíduo de construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007

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

OLIVEIRA M. J. E. de, ASSIS C. S. de, Estudo da deterioração de concreto proveniente de demolição de obras de construção civil e seu comportamento em relação ao meio ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Salvador,, 41, 1999. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Ibracon, 1999.

OYANADEL, V. V. L. **Influencia Del Contenido de Adiciones Puzolánicas y Del Proceso de Elaboración de La Mezcla em La Resistencia Mecánica Del Hormigón**. Chile. Memoria para optar al título de ingeniera civil – Departamento de Ingeniería Civil – Universidad de Chile, 2009.

PADMINI, A. K; RAMAMURTHY; MATHEWS, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 23(1), 829-836. 2009

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2013.

PAPADAKIS, V.G.; FARDIS, M.N.; VAYENAS, C.G. Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete..**ACI Materials Journal**, v.88, n.2, p.186-196,1991.

PAUL K, P. et al..**An alternative to AN sand**. Kerala.Índia, 2003.137 f. Monografia (B. Tech. degree in Civil Engineering) – Departament of Civil Engineering, Mahatma.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; KAZMIERCZAK, C.S. Degradação do concreto por carbonatação: execução do ensaio. **Revista Concreto**, n.53, p. 40 – 47, 2009.

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

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

POON, C. .; SHUI, Z. .; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 461–468, 2004.

POON, C. S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31–36, 2004.

POPE, A.W., JENNINGS, H.M., The Influence of Mixing on the Microstructure of Cement Paste/Aggregate Interfacial Zone and on the Strength of Mortar. **Journal of Materials Science**, 27, [23] 6452-6462, 1992

PRISZKULNIK, S. Aspectos reológicos do cimento fresco e sua dosagem: Métodos ACI e ITTERS. In: Colóquio de dosagem de cimento, São Paulo, 1977. **Anais...** São Paulo, 1977.

PROCEQ **Especificações técnicas do RESIPOD**. Disponível em: http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/Resipod/Portuguese/Resipod_SF_P_2013.06.19_low.pdf. Acesso em 27 de maio de 2014.

REJEB, S. K. Improving compressive strength of concrete by a two-step mixing method. **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, p. 585-592, 1996.

REZENDE, L. V. S. ET AL. Resistência do concreto dosado em central - classificação e aspectos de durabilidade. In: CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DE ENGENHARIA CIVIL. Florianópolis, 1996. **Anais...**

SAETTA, A. V.; VITALIANI, R. V. Experimental investigation and numerical modelling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 571 – 579, 2004.

SALAS, A.; ROESLER, J.; LANGE, D.A. Lange. Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements. In: MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010, 89. Anais... Washington D.C., 2010.

SAMI, W. T.; AKMAL, S. A. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1163–1167, 2009.

SANTOS, A. N. **Diagnóstico da situação dos resíduos de construção e demolição (RCD) no município de Petrolina (PE)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Católica de Pernambuco, Recife, PE, 2008.

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

SARTORI, B.R.C. ; FEDUMENTI, M.B. ; KULAKOWSKI, M.P.; KAZMIERCZAK, C.S.. **Estudo da carbonatação em concretos com adição de cinza de casca de arroz e agregado reciclado de concreto**. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil - ENARC 2013, 3. e I Workshop sobre Resíduos de Construção e Demolição, 2013, São Leopoldo. **Anais ...** São Leopoldo: Casa Leiria, 2013. v. 1. p. 15p.

SBRIGHI NETO, C. Agregados para Concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (org.). **Concreto – ensino, pesquisa e realizações**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 11, p. 323-343

SBRIGHI NETO, C. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (org.) **Concreto Ciência e Tecnologia**. V.1, cap 7. São Paulo: Ibracon, 2011.

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

SCRIVENER, K.L. **Effect os SCMs on durability: carbonation and chloride. Avanços em ciência e tecnologia de cimentos e adições ativas, 12 a 14 de Agosto de 2013**. In: Curso sobre Avanços em ciência e tecnologia de cimentos e adições ativas. Notas de aula... Lecture9, São Paulo, 2013.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE URBANO. **Guia para elaboração dos Planos de Gestão de Resíduos Sólidos**, 2011. Disponível em: http://www.cidadessustentaveis.org.br/sites/default/files/arquivos/guia_elaboracao_planos_ge_stao_residuos_solidos_mma.pdf>, acesso em: 11 de novembro de 2014.

SHREIR, L. L. (Ed.) **Corrosion control**. New York: John Willey e Sons, Inc., v. 2, p. 11:55-11:71, 1963.

SMITH, K. M.; SCHOKKER, A. J.; TIKALSKY, P. J. Performance of supplementary cementitious materials in concrete resistivity and corrosion monitoring evaluations. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 5, p. 385-390, september-october, 2004.

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

TAM, V.W.Y., Tam, C., LE, K.N. **Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches**. **Resources, Conservation and Recycling**, v.50, p.82-101, 2007.

TASHIRO, C.; ISHIDA, H.; SHIMAMURA, S. Dependence of the electrical resistivity on evaporable water content in hardened cement pastes. **Journal of Materials Science Letters**, [S.l.], v. 6, p. 1379-1381, 1987.

TATTERSALL, G. H. **The Workability of Concrete: a view point publication**. London: Cement and Concrete Association, 1978.

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. **ConcretoPré-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. **Cement and Concrete Research**, Vol. 34, pg. 1307-1312, 2004.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

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

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

VASCONCELLOS, J. M. C. **Fundamentos da dosagem racional dos concretos**. Palestra proferida durante a sessão de instalação da Seção regional de Pernambuco do IBRACON em 30/11/ 1977, em São Paulo.

WEI, X.; LI, Z.. Early hydration process of Portland cement paste by electrical measurement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.l.], v. 18, n. 1, feb. 2006.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 213–228, 2011.

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

APÊNDICES

Tabela(A) 1- Resultados de resistividade elétrica no estado endurecido

Relação a/c	Umidade do ambiente (%)		Médias de resistividade (kΩ/cm)			
			1 dia	7 dias	28 dias	63 dias
0,42	100	Referência	11,1	17,7	29,3	32,7
		50% Inicial	9,6	18,8	26,7	33,6
		50% Final	8,3	20,5	26,1	31,6
	70	Referência	11,1	30,8	64,6	96,6
		50% Inicial	8,7	24,1	70,6	130,9
		50% Final	8,9	34,2	73,9	105,2
	SemControle	Referência	10,9	30,1	54,5	100,9
		50% Inicial	9,6	31,5	69,8	134,0
		50% Final	8,2	31,8	63,8	119,0
0,53	100	Referência	7,8	14,5	22,8	26,8
		50% Inicial	6,5	13,8	21,4	26,3
		50% Final	5,5	18,0	21,6	27,3
	70	Referência	7,2	30,8	66,0	98,1
		50% Inicial	6,8	28,9	76,3	141,1
		50% Final	5,4	34,7	68,8	225,2
	SemControle	Referência	7,3	29,4	67,9	124,1
		50% Inicial	7,0	37,6	85,0	157,8
		50% Final	5,4	38,6	65,3	131,2
0,64	100	Referência	6,3	13,8	20,1	23,6
		50% Inicial	5,1	12,7	19,2	24,5
		50% Final	4,4	17,4	19,1	23,8
	70	Referência	6,5	34,3	76,2	119,7
		50% Inicial	5,1	30,2	57,3	136,2
		50% Final	4,2	34,6	74,8	111,9
	SemControle	Referência	6,2	37,3	74,8	131,5
		50% Inicial	5,5	39,7	83,5	152,6
		50% Final	4,4	39,3	79,6	132,4

