



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

NÍVEL DE MESTRADO

MICHELI SILVEIRA GONÇALVES

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONCRETO ORIUNDOS
DA PRÉ-FABRICAÇÃO COMO AGREGADO GRAÚDO PARA
A PRODUÇÃO DE NOVOS CONCRETOS**

SÃO LEOPOLDO 2011

MICHELI SILVEIRA GONÇALVES

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONCRETO ORIUNDOS
DA PRÉ-FABRICAÇÃO COMO AGREGADO GRAÚDO PARA
A PRODUÇÃO DE NOVOS CONCRETOS**

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

Orientadora: Prof^a. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Coorientador: Prof. Dr. Cláudio de Souza
Kazmierczak

Banca examinadora: Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves –
UFBA

Prof^a. Dra. Jane Proszek Gorninski -
Unisinos

SÃO LEOPOLDO

MARÇO, 2011.

MICHELI SILVEIRA GONÇALVES

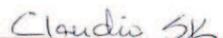
**“ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO
DE RESÍDUOS DE CONCRETO ORIUNDOS DA PRÉ-
FABRICAÇÃO COMO AGREGADO GRAÚDO PARA A
PRODUÇÃO DE NOVOS CONCRETOS”**

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 25 de março de 2011



Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski
Orientadora



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Coorientador

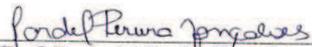


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Coordenador do PPGEC/UNISINOS

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Jane Proszek Gornuski – UNISINOS



Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves – UFBA

Dedico essa conquista ao meu filho Arthur e ao meu esposo Eduardo por todo amor, compreensão, dedicação e principalmente, por abrirem mão dos seus sonhos para sonharem o meu.

AGRADECIMENTOS

É com lágrimas nos olhos, mas coração sorridente que deixo aqui registrado estes agradecimentos, que são merecidos a todos que de alguma forma participaram da realização desta conquista.

Primeiramente agradeço a Deus, pela constante presença em minha vida e por ter me possibilitado saúde física e mental para finalizar esta pesquisa.

À minha querida orientadora a professora Marlova Piva Kulakowski, que me acompanhou nos momentos difíceis demonstrando acima de tudo companheirismo e amizade.

Ao professor Claudio de Souza Kazmierczak, pela sua sabedoria e orientação ao longo de toda pesquisa.

A todos os professores que de alguma forma contribuíram com ensinamentos e sugestões durante o decorrer da pesquisa.

Ao Laboratório de Materiais da Engenharia Civil e seus funcionários, por toda a estrutura dada para a realização dos ensaios, apoio e amizade dispensada.

A bolsista de iniciação científica Taiane pela ajuda na realização dos ensaios e pela amizade.

A CAPES/PROSUP, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos meus amigos e colegas pelo apoio.

A minhas irmãs, sobrinhos e família por compreenderem minhas faltas.

A minha sogra pela dedicação ao meu filho decorrente das minhas ausências.

Ao meu pai que sempre foi um estímulo quanto à aquisição de conhecimento.

A minha mãe por ouvir todos os meus desabafos durante os momentos de angústia e cansaço e por todas as orações realizadas.

Ao meu esposo Eduardo pela contribuição de valor inestimável durante os trabalhos de laboratório, na empresa parceira ao projeto, por todo carinho, cuidado e principalmente pelo amor e dedicação ao nosso filho suprimindo minha ausência.

Ao meu maior amor, meu filho Arthur, luz da minha vida, quem faz sempre tudo valer a pena, e a quem eu quero ser exemplo de ética, força, perseverança e profissionalismo e a quem dedico esta vitória.

RESUMO

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONCRETO ORIUNDOS DA PRÉ-FABRICAÇÃO COMO AGREGADO GRAÚDO PARA A PRODUÇÃO DE NOVOS CONCRETOS

MICHELI SILVEIRA GONÇALVES

A preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais tem levado à busca por alternativas de crescimento mais sustentáveis por parte de todos os segmentos da sociedade. Dentro desta corrida pelo bem estar ambiental, a reciclagem de resíduos tem se mostrado uma boa alternativa na redução do impacto causado pelo consumo desordenado de matéria-prima e pela redução das áreas de disposição, em virtude do grande volume de resíduos descartados a cada ano em todo mundo. Neste contexto encontram-se inseridos os resíduos da construção civil, foco deste trabalho, o qual tem como objetivo o estudo da influência da utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos e à verificação da potencialidade de reciclagem dos resíduos gerados pela indústria de pré-fabricados em concreto localizada no município de Porto Alegre. Para as novas matrizes de concreto confeccionaram-se três traços, com os dois resíduos gerados em maior quantidade pela indústria, sendo realizada a substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado de concreto na quantidade de 50% em volume. Utilizou-se água de compensação na confecção dos concretos com agregado reciclado devido as diferentes absorções de água. Nestes novos concretos verificou-se a influência do agregado reciclado sobre as propriedades mecânicas (resistência à compressão e à tração), propriedade de durabilidade (absorção de água) e observado o monitoramento da evolução da temperatura das reações de hidratação. A partir dos resultados obtidos realizaram-se análises estatísticas e apresentaram-se modelos matemáticos. Concluindo-se que os concretos confeccionados com ARCs, oriundos do processo de cura convencional, apresentaram acréscimo nas propriedades de resistência à compressão e à tração, enquanto os oriundos do processo de cura térmica, decréscimo quando comparados à referência. Já para a propriedade de absorção de água, verificou-se um aumento para os dois tipos de ARCs, quando compara-se à referência, não sendo este aumento significativo em escala real. Para o monitoramento da evolução da temperatura das reações de hidratação da pasta do concreto, verificou-se redução do início dos tempos, para as amostras contendo agregado reciclado, sem a presença de aditivo, ao comparar-se à referência, já para as amostras com aditivo, verificou-se maiores valores de temperatura, não sendo observada nenhuma tendência quanto ao início e fim dos tempos de evolução da temperatura das reações de hidratação das amostras de concreto.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto. Propriedades mecânicas. Propriedades de durabilidade

ABSTRACT

TECHNICAL VIABILITY ANALYSIS FOR THE USE OF CONCRETE WASTE COMING FROM PRE-FABRICATION AS COARSE AGGREGATE FOR THE PRODUCTION OF NEW CONCRETE

MICHELI SILVEIRA GONÇALVES

The concern about the environment and the lack of natural resources has led all segments of society to the search for more sustainable alternatives of growth. In this run for environmental welfare, the recycling of material waste seems to be a good alternative for the reduction of the impact caused by the messy consumption of raw material and the reduction of provision areas, by virtue of the great amount of discarded waste every year in the world. In this context is the waste coming from civil construction, the focus of this work, which aims to study the influence of the use of recycled concrete aggregate for the production of new concrete and also the verification of the recycling potential of the waste generated by the industry of precast concrete located in the city of Porto Alegre. For new concrete matrixes crafted three traces, with the two waste materials generated in most part by the industry, having the replacement of the natural coarse aggregate been done with the recycled concrete in the volume of 50%. Compensation water was used in the making of concrete with recycled aggregate due to different levels of water absorption. In this new concrete was checked the influence of the recycled aggregate over the mechanical properties (resistance to compression and traction), durability property (water absorption) and was observed the monitoring of the evolution of temperature of the hydration reactions. From the results obtained, statistical analyses and mathematical models were made. It can be concluded that the concrete manufactured with RCA's (recycled concrete aggregate) coming from the conventional cure process showed increase in the properties of resistance to compression and to traction, while the ones coming from the process of thermal cure show decrease when compared to the reference. As for the property of water absorption, there is an increase for both kinds of RCA's when compared to the reference, not constituting a significant increase in real scale. For the monitoring of the temperature evolution of the hydration reactions of the concrete paste was verified decrease of the beginning of time for samples containing recycled aggregate without the presence of additive, when compared to the reference, was verified higher values of temperature, not having been observed any tendency regarding as start and end times for the evolution of temperature the reactions of hydration of concrete samples.

Keywords: Recycled concrete aggregate. Mechanical properties. Durability property.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma dos projetos desenvolvidos com utilização de RCD com participação da Unisinos.....	16
Figura 2 - Britador de Mandíbula com alta capacidade de produção.....	27
Figura 3 - Britador de Impacto.....	28
Figura 4 - Britador de Cones.....	28
Figura 5 - Britador de Rolos.....	29
Figura 6 - Britador de Martelo.....	29
Figura 7 - Circuito fechado de britagem.....	30
Figura 8 - (a) Curvas de velocidade típicas de formação de produtos hidratados em uma pasta de cimento Portland comum; (b) influência da formação de produtos hidratados no tempo de pega, porosidade, permeabilidade e resistência da pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).....	37
Figura 9 - Curva da distribuição granulométrica da areia.....	52
Figura 10 – Aspecto geral do resíduo de concreto após beneficiamento.....	57
Figura 11 - Visualização da análise de absorção de água dos agregados reciclados de concreto em balança hidrostática.....	59
Figura 12 - Curva de absorção de água do RCT para os 7, 28 e 63 dias de cura submersa.....	60
Figura 13 - Curva de absorção de água do RCC para os 7, 28 e 63 dias de cura submersa.....	61
Figura 14 - Absorção de água do RCT e RCC, com 28 dias de cura e AGN.....	61
Figura 15 - Curva da Distribuição Granulométrica do RCT para os 7, 28 e 63 dias de cura submersa.....	64
Figura 16 - Curva da Distribuição Granulométrica do RCC para os 7, 28 e 63 dias de cura submersa.....	65
Figura 17 - Curva da Distribuição Granulométrica comparativa entre o RCT, RCC, para a idade de 28 dias de cura submersa, e a composição do AGN (40%b0 e 60%b1).....	65
Figura 18 – RCC, aumento de 80 vezes, detector BSE.....	66
Figura 19 – RCC, aumento de 540 vezes, detector SE.....	67
Figura 20 – RCC, aumento de 3.000 vezes, detector SE.....	67
Figura 21 - RCT, aumento de 80 vezes, detector BSE.....	68
Figura 22 - RCT, aumento de 540 vezes, detector SE.....	68
Figura 23 - RCT, aumento de 3.000 vezes, detector SE.....	69
Figura 24 - Ensaio de resistência à compressão axial.....	74
Figura 25 - Ensaio de resistência à compressão por tração diametral.....	74
Figura 26 – Desenho esquemático do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	75
Figura 27 - Sistema de absorção de água por capilaridade.....	76
Figura 28 – Preparação de amostras para o ensaio de monitoramento da temperatura das reações de hidratação.....	77
Figura 29 – Amostras dispostas no compartimento isolado, acopladas a termopares.....	77
Figura 30 – Início e fim da evolução da temperatura de hidratação.....	78
Figura 31 – Diagrama de Abrams, curva da Lei de Molinary e reta de Lyse, para as três novas matrizes de concreto com 7 dias de idade.....	81
Figura 32 - Diagrama de Abrams, curva da Lei de Monary e reta de Lyse, para as três novas matrizes de concreto com idade de 28 dias.....	82
Figura 33 - Diagrama de Abrams, curva da Lei de Monary e reta de Lyse, para as três novas matrizes de concreto com idade de 63 dias.....	83
Figura 34 – Valores encontrados para as três novas matrizes de concreto com os dois tipos de resíduos utilizados.....	85

Figura 35 – Efeito da variável agregado no comportamento de resistência à tração por compressão diametral.....	88
Figura 36– Absorção de água ao longo do tempo – Traço Pobre.	90
Figura 37– Absorção de água ao longo do tempo – Traço Intermediário.	90
Figura 38– Absorção de água ao longo do tempo – Traço Rico.	91
Figura 39 - Absorção de água por capilaridade em relação aos diferentes tipos de agregado.	92
Figura 40 - Absorção de água por capilaridade em relação aos diferentes tipos de agregado.	95
Figura 41- Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo-Traço Pobre.	96
Figura 42 – Evolução da temperatura das reações de hidratação longo do tempo-Traço Intermediário.	97
Figura 43 – Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo-Traço Rico.	97
Figura 44 – Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo das amostras contendo aditivo superplastificante -Traço Pobre.	99
Figura 45 – Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo das amostras contendo aditivo superplastificante -Traço Intermediário.....	99
Figura 46 – Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo das amostras contendo aditivo superplastificante -Traço Rico.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativas de geração de resíduos de construção civil.....	21
Tabela 2- Dados sobre a geração de resíduos de construção em algumas cidades brasileiras.	22
Tabela 3 - Componentes do RCD em relação ao tipo de obra em que foi gerado.	23
Tabela 4 - Composição do RCD da cidade de Porto Alegre/RS.	23
Tabela 5 - Composição do RCD da cidade de São Leopoldo/RS.	24
Tabela 6 - Composição do RCD da cidade de Novo Hamburgo/RS.	24
Tabela 7 – Quantificação dos resíduos gerados na indústria de pré-fabricados.	50
Tabela 8 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI.	51
Tabela 9 - Características granulométricas ¹ do agregado miúdo.	52
Tabela 10 - Características físicas dos agregados miúdos naturais, areia.	53
Tabela 11 - Composição granulométrica ¹ do agregado graúdo natural (AGN), brita 0.	53
Tabela 12 - Composição granulométrica ¹ do agregado graúdo natural (AGN), brita 1.	54
Tabela 13 - Composição granulométrica ¹ dos agregados graúdos naturais (AGNs).	54
Tabela 14 - Características físicas do agregado graúdo natural, na proporção utilizada, 40%b0 e 60%b1.	55
Tabela 15 - Características do aditivo superplastificante fornecidas pelo fabricante.	56
Tabela 16 - Resistência média à compressão axial dos agregados reciclados de concretos (ARC) ²	58
Tabela 17 - % de Absorção de água do ARC-RCT, ARC-RCC e AGN.	60
Tabela 18 - Massa Específica (g/cm ³) dos ARCs.	63
Tabela 19 - Massa Unitária dos Resíduos de Concreto.	63
Tabela 20 - Composição Granulométrica ¹ do ARCs para diversas idades de cura submersa.	64
Tabela 21 - Nomenclatura dos traços de concretos do programa experimental.	70
Tabela 22 – Quantidades de materiais e traços empregados nas misturas.	71
Tabela 23 - Médias de resistência à compressão axial.	79
Tabela 24 – Equações de ajuste da curva de Abrams.	80
Tabela 25 – Análise de variância da resistência à compressão axial.	84
Tabela 26 - Médias da resistência à tração por compressão diametral.	85
Tabela 27 - Anova do modelo para resistência à tração por compressão diametral.	87
Tabela 28 - Parâmetro das variáveis analisadas para a resistência à tração por compressão diametral.	87
Tabela 29 – Médias da porcentagem de absorção de água ao longo do tempo.	89
Tabela 30 - Anova do modelo para absorção de água por capilaridade.	91
Tabela 31 - Parâmetro das variáveis analisadas para a absorção de água por capilaridade.	91
Tabela 32 - Anova do modelo para absorção de água por capilaridade com recuperação do valor para o traço intermediário.	94
Tabela 33 - Parâmetro das variáveis analisadas para a absorção de água por capilaridade com recuperação do valor para o traço intermediário.	94
Tabela 34 – Tempo de evolução da temperatura das reações de hidratação e a respectiva temperatura, das amostras confeccionadas sem a presença de aditivo.	96
Tabela 35 - Tempo de evolução da temperatura das reações de hidratação e a respectiva temperatura, das amostras confeccionadas com a presença de aditivo.	98

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ABCIC – Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto

MPa – MegaPascal

GPa – GigaPascal

C₂S - Silicato Dicálcico

C₃S - Silicato Tricálcico

C₃A - Aluminato Tricálcico

CSH - Silicatos Hidratados

C₄AF – Ferro Aluminato Tetracálcico

AFt – Etringita

AFm - Monossulfato

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	17
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	19
2.1.1	Definição.....	19
2.1.2	Classificação	20
2.1.3	Quantificação	21
2.1.4	Composição e variabilidade	22
2.2	CONCRETOS CONFECCIONADOS COM AGREGADOS RECICLADOS	25
2.2.1	Recuperação dos resíduos de concreto.....	25
2.2.2	Características do concreto e a influência do agregado reciclado de concreto.....	26
2.2.3	Beneficiamento dos resíduos de concreto	26
2.2.3.1	Cominuição	26
2.2.3.4	Separação por Tamanho.....	30
2.2.3.3	Concentração	30
2.2.3.4	Operações Auxiliares	30
2.2.4	Características dos agregados reciclados de concreto	30
2.2.5	Características dos concretos fabricados com agregados reciclados de concreto	34
2.2.5.1	Propriedades no estado fresco.....	34
2.2.5.2	Propriedades no estado endurecido.....	39
2.2.5.2.1	<i>Propriedades mecânicas</i>	39
2.2.5.2.2	<i>Propriedades de durabilidade</i>	42
2.3	PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO	45
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	47
3.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	47
3.2	FATORES DE CONTROLE E VARIÁVEIS DE RESPOSTA	48
3.3	ESTUDO DE CASO.....	49
3.4	MATERIAIS	51
3.4.1	Cimento CP V-ARI.....	51
3.4.2	Agregados	52
3.4.2.1	Míúdo natural.....	52
3.2.4.2	Graúdo natural	53

3.4.3	Água.....	55
3.4.4	Aditivo.....	55
3.4.5	Cinza volante.....	56
3.4.6	Agregado reciclado de concreto (ARC).....	56
3.4.6.1	Resistência à compressão axial.....	57
3.4.6.2	Absorção de água por imersão.....	58
3.4.6.3	Massa específica.....	63
3.4.6.4	Massa unitária.....	63
3.4.6.5	Determinação da composição granulométrica.....	63
3.4.6.6	Forma do grão.....	65
3.4.6.7	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	66
3.5	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E DOS CORPOS DE PROVA.....	69
3.6	MÉTODOS DE ENSAIO.....	73
3.6.1	Ensaio mecânicos.....	73
3.6.1.1	Resistência à compressão axial.....	73
3.6.1.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	74
3.6.2	Ensaio de durabilidade.....	75
3.6.2.1	Absorção de água por capilaridade.....	75
3.6.3	Evolução da temperatura das reações de hidratação.....	76
3.6.4	Análise estatística.....	78
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	79
4.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	79
4.1.1	Resistência à compressão axial.....	79
4.1.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	85
4.2	DURABILIDADE.....	88
4.2.1	Absorção de água por capilaridade.....	89
4.3	MONITORAMENTO DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DAS REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO.....	95
5	CONCLUSÃO.....	101
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
	APÊNDICES.....	112

1 INTRODUÇÃO

Na história do desenvolvimento humano, a visão do progresso confundia-se com o crescente domínio e transformação da natureza. Neste contexto, os recursos naturais eram considerados ilimitados, sendo a preservação da natureza vista como antagônica ao desenvolvimento. Os primeiros sinais de que esta era uma visão equivocada foram as considerações a respeito da poluição do ar e da água, que levou à geração do conceito de controle ambiental e o estabelecimento de legislação limitando a geração de poluentes.

No modelo produtivo atual os resíduos sempre são gerados, seja na produção de bens de consumo duráveis (edifícios, pontes e estradas) ou não duráveis (embalagens descartáveis). Neste modelo a produção quase sempre utiliza matérias-primas não renováveis de origem natural, o que, até recentemente, não apresentava problemas em razão da abundância de recursos naturais e menor quantidade de pessoas incorporadas à sociedade de consumo (JOHN, 2000).

Os resíduos sólidos transformaram-se num grande problema com o aumento populacional e o conseqüente inchaço dos grandes centros urbanos decorrente da Revolução Industrial, a qual propiciou o aparecimento de novas tecnologias e a diversificação de bens de consumo.

Inserida neste contexto encontra-se a indústria da construção civil, que é certamente a maior consumidora de recursos naturais de qualquer economia e grande geradora de resíduos. Para a mitigação dos seus impactos é necessário o desenvolvimento de técnicas de reciclagem que combinem desenvolvimento técnico com proteção ao meio ambiente.

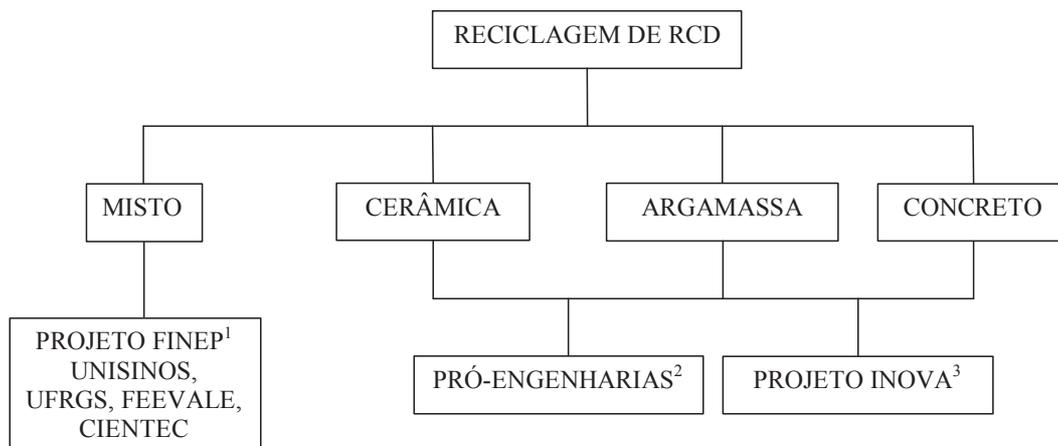
Segundo Angulo et al., (2004), os resíduos sólidos denominados como resíduos de construção e demolição (RCD), são de maneira geral uma preocupação relativamente recente no Brasil, diferente da realidade de outros países como EUA, Alemanha e Holanda, onde já existem políticas que privilegiam a compra de produtos ambientalmente sustentáveis. O autor salientou que em cidades onde não existem políticas modernas de gerenciamento de RCD, estes são depositados irregularmente pela malha urbana, gerando altos custos sócio-econômicos, assoreamento de rios, entupimento de bueiros, degradação de áreas urbanas, entre outros. A remoção desses resíduos depositados irregularmente custa aos municípios uma quantidade significativa de recursos, os quais poderiam estar sendo direcionados para a criação de melhor infra-estrutura para a população em geral (PINTO, 1999).

Na busca pela preservação ambiental, a reciclagem de resíduos tem se mostrado como uma alternativa eficaz na redução dos impactos causados pelo consumo desordenado de matéria-prima e pela disposição inadequada de resíduos. O uso destes resíduos como fonte alternativa de matéria-prima, dentro do próprio setor que os produziu, constitui um desafio para o meio técnico-científico.

O presente trabalho propõe um estudo de concretos produzidos com agregado reciclado, oriundos de resíduos da indústria de pré-fabricados em concreto, onde se pretende avaliar propriedades mecânicas, de durabilidade e o monitoramento da evolução da temperatura das reações de hidratação dos novos concretos a serem confeccionados. Os resíduos gerados por este segmento da indústria da construção civil possuem características diferenciadas, sendo basicamente compostos por concretos. Razão esta que favorece a reciclagem, a qual aliada à necessidade de passar a conviver de maneira mais harmônica com o meio ambiente, alavancaram iniciativas destas indústrias, as quais iniciaram algumas pesquisas sobre os resíduos gerados no seu processo produtivo, com vistas à produção de novas peças de concreto.

Desta forma surgiu a necessidade de compreender a influência da substituição de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto, visto que várias pesquisas, entre elas Leite (2001), Angulo (2005), Cabral (2007), já realizam estudos com RCD (resíduos da construção e demolição) mistos, observando a heterogeneidade do material. Os resultados alcançados nas pesquisas indicaram a necessidade de estudo das características individuais de cada material que compõem o RCD.

Neste contexto, foram desenvolvidos diversos projetos individuais e em rede de cooperação. O projeto “Componentes com Agregados Reciclados para Habitação de Interesse Social” (2004-2007), desenvolvido em parceria com a Ufrgs, Feevale e Cientec, resultando em produções científicas, como o trabalho de Kamierczak et. al., (2006) e o de Lovato (2007) com RCD misto. Posteriormente foi desenvolvido o projeto “Ações de Inovação na Engenharia-INOVA” (2007) que, entre outros, resultou nos trabalhos de Troian (2010) e Werle (2010). O projeto “Controle dos Parâmetros Responsáveis pela Viabilidade dos Agregados de RCD com vistas à Transformação Tecnológica para sua Utilização em Concretos e Argamassas” (2008), o qual resultou até o momento na presente dissertação e no trabalho de Cavalheiro (2011) em desenvolvimento. A Figura 1 apresenta um organograma destes projetos.



¹ Edital MCT/FINEP/FVA 01/2003 “Habitar Componentes com Agregados Reciclados para Habitação de Interesse Social”(2004-2007).

² Edital Pró-Engenharias nº01/2007 (CAPES)

“Utilização de RCD na Construção Civil – Controle dos Parâmetros Responsáveis pela Viabilidade do Agregado de RCD”

“UNISINOS – Controle dos Parâmetros Responsáveis pela Viabilidade dos Agregados de RCD com vistas à Transferência Tecnológica para sua utilização em Concretos e Argamassas”.

³ Edital MCT/FINEP/FNDCT-PROMOVE-Laboratórios de Inovação 06/2006. “Projeto Ações de Inovação na Engenharia Inova (2007).

Figura 1 – Organograma dos projetos desenvolvidos com utilização de RCD com participação da Unisinos.

1.1 OBJETIVOS

O **Objetivo Principal** desta pesquisa é analisar a viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto, oriundos da pré-fabricação, como agregado graúdo para a produção de novos concretos.

Os **Objetivos Específicos** do trabalho são:

- Verificar a influência da incorporação de agregados reciclados de concreto, sujeitos a diferentes tipos de cura, na produção de novos concretos, quanto às propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral);
- Verificar a influência da incorporação de agregados reciclados de concreto, sujeitos a diferentes tipos de cura, na produção de novos concretos, quanto à propriedade de durabilidade de absorção de água;
- Verificar a influência da incorporação de agregados reciclados de concreto, sujeitos a diferentes tipos de cura, na produção de novos concretos, quanto à evolução da temperatura das reações de hidratação do concreto;

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Definidos os objetivos da pesquisa as limitações da mesma podem ser traçadas.

Diversos são os fatores que influenciam as propriedades mecânicas, de durabilidade e a evolução da temperatura de hidratação dos concretos, sendo que os materiais que os constituem: água, agregados, cimento e aditivos, possuem importante papel neste sistema. Dentre os fatores que influenciam estas propriedades serão estudados os relacionados aos agregados graúdos, oriundos do processo de reciclagem do concreto, novas matrizes de concreto a serem confeccionadas, teor de substituição do agregado natural pelo reciclado, tipo de cimento, forma de adensamento e cura.

Tendo em vista a impossibilidade de avaliação do grau de influência de cada fator, estabeleceu-se o programa experimental no capítulo 3, o qual delimitou o horizonte da pesquisa.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, apresentando a seguinte estrutura:

O capítulo um apresenta a introdução, delimita o tema, define os objetivos principal e específicos e formula a questão de estudo.

O capítulo dois é dedicado a uma revisão bibliográfica sobre a geração de resíduos da construção e demolição, propriedades dos agregados reciclados de concreto, e sua influência no concreto no estado fresco e endurecido, também apresenta um panorama geral sobre os pré-fabricados em concreto.

No capítulo três encontram-se as variáveis envolvidas no estudo e o programa experimental, apresentando materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

Os resultados encontram-se no capítulo quatro, bem como a análise destes, e finalmente, o capítulo cinco, destina-se às conclusões obtidas durante a análise dos resultados e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na origem da sociedade industrial, o desenvolvimento econômico tem significado a transformação da natureza de maneira a melhorar a qualidade de vida de parcela da população. Dentro desta sociedade a função da construção civil é a transformação do ambiente natural no ambiente construído, adequado ao desenvolvimento das mais diversas atividades. Neste contexto, segundo John (2000), a visão da defesa do ambiente é vista como antidesenvolvimentista.

A cadeia produtiva do setor de construção, ou a *construbusiness*, como tem sido chamada, 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 uma grande quantidade de matérias-primas não renováveis, como os recursos minerais, explorando jazidas para a obtenção de materiais “necessários” ao desenvolvimento humano.

A construção civil é considerada um dos maiores agentes de degradação do ambiente. De acordo com Oikonomou (2005), o setor consome grande quantidade de recursos naturais, 40% do total de energia e gera 50% do total de resíduos sólidos produzidos no mundo. Conforme Eguchi et. al., (2007), a indústria da construção produz o equivalente a 75 milhões de toneladas/ano de resíduos industriais. Segundo Angulo (2000), esta indústria também apresenta grande geração de impactos ambientais, abrangendo desde as emissões de gás carbônico na atmosfera para a fabricação de cimento até a disposição dos resíduos sólidos gerados em aterros.

Em países desenvolvidos e em desenvolvimento, como o Brasil, os quais ampliam continuamente o ambiente construído, existe a tendência de consumo elevado de insumos inerentes à construção civil, extraindo recursos da natureza e gerando uma grande quantidade de resíduos da construção e demolição (RCD).

Os resíduos são produtos decorrentes de atividades extrativistas, produção industrial e serviços. Podem ser chamados de subprodutos ou coprodutos quando adquirem um valor comercial. Como é o caso, por exemplo, da sílica ativa, um coproduto da indústria de ferro-ligas e silício metálico, hoje largamente empregada na construção civil, como adição mineral (JOHN, 2001).

O quadro mais comum encontrado nos municípios de médio e grande porte é a inadequada disposição de grandes volumes de resíduos da construção e demolição em aterro de inertes ou bota-foras. O problema mais significativo dessa parcela dos resíduos é o inexorável e rápido esgotamento das áreas destinadas à disposição (PINTO, 1999). Outra questão é que, sendo o RCD considerado não-inerte, pelo menos por alguns autores (OLIVEIRA, 2002; CONAMA, 2002), esses aterros não devem ser considerados uma prática adequada, pois não consideram a lixiviação de efluentes poluentes, não possuindo soluções técnicas para o seu tratamento ou destino (SCOTT, 2006).

Segundo Brum (2006), os resíduos da construção e demolição tem como impactos significativos uma elevada geração e a disposição irregular. Nestes locais ocorre o abandono de resíduos classificáveis como volumosos, para os quais também não são oferecidas soluções aos geradores, resíduos vegetais e outros resíduos não inertes que aceleram a deterioração das condições ambientais locais. A presença dos RCD e de outros resíduos criam um ambiente propício para a proliferação de vetores prejudiciais às condições de saneamento e à saúde humana. É comum nos “bota-foras” e nos locais de disposições irregulares a presença de roedores, insetos peçonhentos (aranhas e escorpiões) e transmissores de endemias perigosas como o mosquito *Aedes Egyptis*, transmissor da dengue.

Segundo Butler (2003), dentre os vários resíduos da construção civil, podem ser citados os resíduos de concreto como tendo um dos maiores potenciais de utilização, devido ao conhecimento de suas propriedades básicas (fc, idade, etc) e seu menor grau de contaminação por outros materiais, quando comparados com outros resíduos da construção. Os principais agentes geradores de resíduos de concreto são as indústrias de pré-fabricados, usinas de concreto pré-misturado, demolições de construções e pavimentos rodoviários.

2.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Os itens que seguem apresentam diversos conceitos, classificações, quantificações, composição e variabilidade sobre a geração dos resíduos da construção e demolição:

2.1.1 Definição

Os resíduos da construção e demolição (RCD) podem ser definidos, de uma forma simplificada, como resíduos provenientes de construções, reparos, reformas e demolições de estruturas e estradas. Encontram-se na literatura diversos conceitos para os resíduos de

construção e demolição, como, por exemplo, a definição de Biocycle (1990) apud Zordan (1997) que apresenta um significado mais amplo para o termo, conceituando os RCDs como resíduos sólidos não contaminados, provenientes tanto da construção, reforma, reparos e demolição, como também resíduos não contaminados de vegetação, resultantes da limpeza e escavação de solos.

Segundo a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), RCD é aquele proveniente de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, além dos resultantes da preparação e da escavação de terrenos. Neste universo enquadram-se como tais: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros.

Conforme Angulo (2000), RCD é todo material oriundo de atividades de demolição de obras civis, restos de obras ou reformas, sendo que o autor Vieira (2003) compartilha desta definição.

2.1.2 Classificação

Existe a classificação segundo a Resolução nº 307, de junho de 2002, e a Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) as quais subdividem os RCDs em quatro subgrupos, de acordo com as possibilidades de reciclagem:

Classe A (resíduos reutilizáveis ou reciclados como agregados) – solos, rochas naturais, concreto, argamassas a base de cimento e cal, resíduos de cerâmica vermelha (tijolos e telhas), cerâmica branca;

Classe B (resíduos recicláveis em outras cadeias) – plásticos, vidros, papéis, papelão, ferro, latas,

Classe C (sem tecnologia de reciclagem desenvolvida ou economicamente viável) - gesso e;

Classe D (perigosos ou materiais que contenham amianto) – latas de solventes, tintas, telhas de amianto, caixa d'água de amianto;

A partir desta classificação, cabe observar, que a definida como Classe A é alvo da maior quantidade de pesquisas científicas relacionadas à reciclagem de resíduos da construção

e demolição, ou seja, reciclados como agregados, sendo tal classe constituída basicamente por materiais cerâmicos e concretos.

2.1.3 Quantificação

Segundo IBGE (2008)¹, a participação da cadeia produtiva da construção civil (o dito *construbusiness*) é 5,0% do PIB trimestral brasileiro, sendo refletido neste tamanho o gigantesco papel que o setor tem em proporcionar um ambiente construído adequado para toda a raça humana e suas complexas atividades econômicas.

De maneira geral os resíduos sólidos, denominados como resíduos de construção e demolição (RCD), representam em torno de 50% em massa dos resíduos sólidos urbanos (ANGULO et al., 2004). As variações das estimativas internacionais ficam entre 130 e 3.700 Kg/hab.ano e nacionais entre 230 Kg/hab.ano e 760 Kg/hab.ano, de acordo com Pinto (1999), para as 10 cidades de médio e grande porte pesquisadas. Admitindo-se uma geração de 510 Kg/hab.ano, correspondente a uma mediana dos valores medidos pelo autor, para uma estimativa de população de 190.732.694 habitantes (IBGE, 2010) no Brasil tem-se uma geração de aproximadamente 9,73.10⁷ton RCD/ano, o que significa uma quantidade expressiva, que em virtude de sua deposição indevida tem recebido grande atenção por parte de prefeituras e de órgãos responsáveis. Na

Tabela 1 observa-se a variabilidade das estimativas de RCDs geradas, de acordo com diferentes fontes para um mesmo país.

Tabela 1 - Estimativas de geração de resíduos de construção civil.

País	Quantidade Anual		Fonte
	Mton/ano	Kg/hab	
Suécia	1,2-6	136-680	TOLSTOY, BÖRKLUND e CARLSON(1998); EU(1999)
Holanda	12,8-20,2	820-1300	LAURITZEN(1998); BROSSINK; BROUWERS E VAN KESSEL(1996); EU(1999)
EUA	136-171	463-584	EPA(1998); PENG, GROSSKOPF, KIBERT(1994)
UK	50-70	880-1120	DETR (1998); LAURITZEN(1998)
Bélgica	7,5-34,7	735-3359	LAURITZEN (1998), EU(1999)
Dinamarca	2,3-10,7	440-2010	
Itália	35-40	600-690	
Alemanha	79-300	963-3658	
Japão	99	785	KASAI(1998)
Portugal	3,2	325	EU(1999)
Brasil	-	230-760	PINTO(1999)

Fonte: Adaptado de John (2000).

¹ Até a finalização desta dissertação não foi possível obter dados mais recentes.

A grande variabilidade nas estimativas apresentadas na

Tabela 1 deve-se provavelmente às diferentes classificações do que é considerado resíduo de construção e demolição.

A Tabela 22 apresenta um levantamento nacional da geração de resíduos da construção e demolição de algumas cidades brasileiras, podendo assim ser observada as especificidades regionais que influenciam tal geração.

Tabela 2- Dados sobre a geração de resíduos de construção em algumas cidades brasileiras.

	População (milhões de habitantes)	Geração de entulho (t/dia)	% de entulho em relação ao resíduo sólido urbano
São Paulo	15,0	5000	-
Porto Alegre	1,20	350	-
Salvador	2,20	1700	37
Ribeirão Preto	0,46	1043	67
São José do Rio Preto	0,32	687	-
Jundiaí	0,29	712	-
Santo André	0,63	1013	58
Belo Horizonte	2,01	1200	51
Vitória da Conquista	0,24	310	-
São José dos Campos	0,50	733	65

Fonte: Leite (2001).

Diante da quantificação dos RCDs gerados nacional e internacionalmente é fácil concluir sobre a relevância da sua reciclagem, sendo uma forma de aproximar o setor da construção civil da sustentabilidade através da redução dos impactos negativos dos seus resíduos nas cidades e da geração de matéria-prima que pode ser substituída pela natural, não renovável (ANGULO et al., 2003).

2.1.4 Composição e variabilidade

Os resíduos provenientes de atividades construtivas geralmente apresentam-se na forma sólida, constituída de materiais densos, com características físicas variáveis, que dependem do processo gerador. Estes resíduos possuem características bastante heterogêneas em relação aos demais resíduos industriais, sendo compostos por uma mistura de restos de praticamente todos os materiais e componentes utilizados pela construção civil. Estas características são sem dúvida um dos grandes empecilhos para aplicação em larga escala dos resíduos de construção e demolição como agregados para novos concretos.

Conforme Lovato (2007), o RCD pode ser constituído por diferentes materiais tais como: solos, rochas naturais, concreto, argamassas, cerâmica vermelha, cerâmica de

revestimento, cimento, gesso, vidro, aço, chapas de aço galvanizado, madeira, plásticos, materiais betuminosos, tintas, papéis de embalagens e restos de vegetais. A composição do RCD está relacionada com as tecnologias e materiais que estão sendo empregados no momento.

Segundo Carneiro et. al., (2001) e Pinto (1999), a composição do RDC é, também, função da fonte que o originou, ou seja, construções, reformas, manutenção e demolições. Pode, ainda, ser atribuída ao período, à técnica de amostragem utilizada e ao local de coleta da amostra – canteiro de obras, aterro, bota-fora, etc.

O tipo de obra pode determinar a composição do RCD gerado, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Componentes do RCD em relação ao tipo de obra em que foi gerado.

	Trabalhos rodoviários (%)	Escavações (%)	Sobras de demolição (%)	Obras diversas (%)	Sobras de limpeza (%)
Concreto	48	6,1	54,3	17,5	18,4
Tijolos	-	0,3	6,3	12,0	5,0
Areia	4,6	9,6	1,4	3,3	1,7
Solo, poeira, lama	16,8	48,9	11,9	16,1	30,5
Rocha	7,0	32,5	11,4	23,1	23,9
Asfalto	23,5	-	1,6	-	0,1
Metais	-	0,5	3,4	6,1	4,4
Madeira de Construção	0,1	1,1	7,2	18,3	10,5
Papel e mat. orgânica	-	1,0	1,6	2,7	3,5
Outros	-	-	0,9	0,9	2,0

Fonte: Hong Kong Polytechnic (1993) apud Moraes (2006).

Em nível regional podem ser encontrados levantamentos da grande variabilidade dos componentes dos resíduos da construção e demolição, como pode ser observado na Tabela 4, a qual apresenta a composição do RCD levantada em estudo realizado pela autora Lovato (2007) na cidade de Porto Alegre/RS.

Tabela 4 - Composição do RCD da cidade de Porto Alegre/RS.

Composição	% Gerada
Argamassa	44,2
Concreto	18,3
Cerâmica vermelha	35,6
Cerâmica branca	0,1
Rocha natural	1,8
Total	100

Fonte: Lovato (2007).

Em nível local, no Vale do Rio dos Sinos, também podem ser encontrados tais levantamentos, como pode ser observado na Tabela 5, a qual apresenta a composição do RCD da cidade de São Leopoldo/RS e Tabela 6 a composição do RCD da cidade de Novo Hamburgo/RS, ambos retirados do estudo realizado pelos autores Kazmierczak et al. (2006).

Tabela 5 - Composição do RCD da cidade de São Leopoldo/RS.

Composição	% Gerado
Cerâmica Vermelha	31,60
Concreto	26,00
Argamassa	22,00
Pedras naturais	17,00
Finos	3,00
Cerâmica de Revestimento	0,40
Total	100

Fonte: Kazmierczak et al., (2006).

Tabela 6 - Composição do RCD da cidade de Novo Hamburgo/RS.

Composição	% Gerado
Argamassa	34,00
Concreto	26,80
Cerâmica Vermelha	22,70
Pedras naturais	14,80
Finos	2,10
Cerâmica de Revestimento	0,20
Total	100

Fonte: Kazmierczak et al., (2006).

Nas tabelas 5 e 6 podem ser observadas a composição variada do RCD, apresentando-se muitas vezes contaminado por materiais perigosos se estes não forem separados na fonte, antes de serem levados a um local de disposição final, podendo contaminar águas e solos, além de prejudicar a saúde de operários que trabalham com este material. Se estes resíduos estiverem estocados em locais inapropriados, através da percolação da água da chuva pode ocorrer uma carreação e formação de elementos químicos prejudiciais ao meio ambiente. Outra questão relevante observada nas tabelas apresentadas é a presença relativamente significativa de resíduos de concreto no RCD, compondo em torno de 25% de RCD, podendo este montante ter maior valor se os resíduos das centrais dosadoras e indústrias de pré-fabricados fossem integralmente direcionados para aterros. Segundo Guerreiro (2007), estes

resíduos em geral são armazenados em “bota-fora” e em área localizada junto às instalações da empresa.

2.2 CONCRETOS CONFECCIONADOS COM AGREGADOS RECICLADOS

Nos parágrafos que seguem são descritas formas de recuperação dos resíduos de concreto, bem como as características destes e sua contribuição para o novo concreto no estado fresco e endurecido.

2.2.1 Recuperação dos resíduos de concreto

De acordo com manual da Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto-ABCIC (2003), em uma indústria de pré-fabricados o concreto desperdiçado é proveniente de elementos rejeitados pelo controle de qualidade, final de linhas de produção e sobras de concreto fresco ao final do processo. Em tais empreendimentos ocorre basicamente a geração de dois tipos de resíduos: rejeitos de concreto no estado fresco e rejeitos de concreto no estado endurecido, existindo inúmeros processos que podem ser aplicados na sua reciclagem.

A forma de reciclagem comumente utilizada para os resíduos de concreto no estado endurecido, que podem ser originários de diversas fontes, é a visando a sua reutilização como agregados em novas misturas ou para confecção de sub-bases e bases de rodovias.

Destaca-se o método proposto por Rashwan e Abourisk (1997) para recuperação do concreto desperdiçado, investigado em conjunto com uma usina de concreto pré-misturado, onde o fundamento do método baseou-se na passagem do concreto no estado plástico para o estado endurecido por um curto período de tempo, depois do qual o concreto poderia ser reciclado para ser utilizado como agregado em novas misturas. Este processo apresenta algumas vantagens:

- a quantidade de resíduos a serem reciclados é pequena, uma vez que a britagem é feita logo após o concreto ser desperdiçado. Com isso, o processo de reciclagem do concreto pode ser feito com a utilização de pequenos britadores móveis, eliminando os custos de transporte;
- o material reciclado é produzido sob condições controladas. Isso inclui o conhecimento do nível de maturidade do concreto original que será reciclado;

- espera-se que as partículas de cimento não-hidratadas, presentes nos agregados reciclados, contribuam para aumentar a quantidade de cimento nos concretos reciclados.

2.2.2 Características do concreto e a influência do agregado reciclado de concreto

É importante conhecer as características e os constituintes do concreto. Um dos seus principais constituintes são os agregados, definidos pela ABNT NBR 7225:2009, os quais podem ser miúdos, graúdos, naturais ou reciclados. A ABNT NBR 15116:2004 define o conceito de agregado reciclado como sendo o material granular originado do beneficiamento dos resíduos de construção e demolição de obras civis, o qual apresenta características técnicas para aplicação em obras de edificação e infra-estrutura. Esta norma classifica em dois os tipos de agregados reciclados, os agregados de resíduo misto (ARM) e os agregados de resíduos de concretos (ARCs), o qual deve ser composto em sua fração graúda por no mínimo 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland e rochas.

Segundo Gonçalves (2001), o concreto possui uma estrutura muito 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.

2.2.3 Beneficiamento dos resíduos de concreto

Para utilização dos resíduos de concreto é necessário beneficiamento, pois os mesmos encontram-se normalmente em grandes dimensões. Segundo Angulo (2003) são quatro as operações unitárias necessárias: cominuição, separação por tamanho, concentração e auxiliares.

2.2.3.1 Cominuição

Também denominadas operações de redução de tamanho, podendo ser realizadas por processo de britagem ou moagem, dependendo da granulometria do material. São operações que consomem grande quantidade de energia e peças de desgaste, ou seja, são de custo elevado.

a) Britador de Mandíbula – Este tipo de britador opera sob o princípio da compressão, onde o material é comprimido entre uma superfície fixa e outra móvel. A moagem ocorre em forma de V, larga na parte superior e estreita na parte baixa.

Segundo Hansen (1985) apud Gonçalves (2001), a utilização do britador de mandíbula fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para a produção de concreto.



Figura 2 - Britador de Mandíbula com alta capacidade de produção

Fonte: Gonçalves (2001).

b) Britador de Impacto – São utilizados para materiais friáveis. Este britador possui uma câmara onde o material é britado através de choque de martelos fixados por um rotor e pelo choque com placas fixas (LIMA, 1999). Fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para ser empregado em sub-bases e bases de rodovias e são menos suscetíveis a materiais que não podem ser britados como barras de aço presente nas estruturas de concreto armado, entretanto, seu custo de manutenção é maior e os agregados graúdos reciclados são de qualidade inferior se comparados com os agregados produzidos pelo britador de mandíbula. Conforme Lima (1999) este equipamento tem como vantagem a alta redução das peças britadas, gerando uma quantidade de finos razoável com grãos de forma cúbica e com boas características mecânicas.



Figura 3 - Britador de Impacto

Fonte: Zenith Mining and Construction (2010)

c) **Britador de Cones** – Utilizado para britagem secundária, processando materiais com diâmetro máximo de 200mm. Produz grãos cúbicos e grande quantidade de finos.



Figura 4 - Britador de Cones

Fonte: Gonçalves (2001).

d) **Britador de Rolos** – Utilizado normalmente em britagem secundária, realiza a fragmentação através da compressão das partículas entre dois cilindros que giram em sentido contrário.

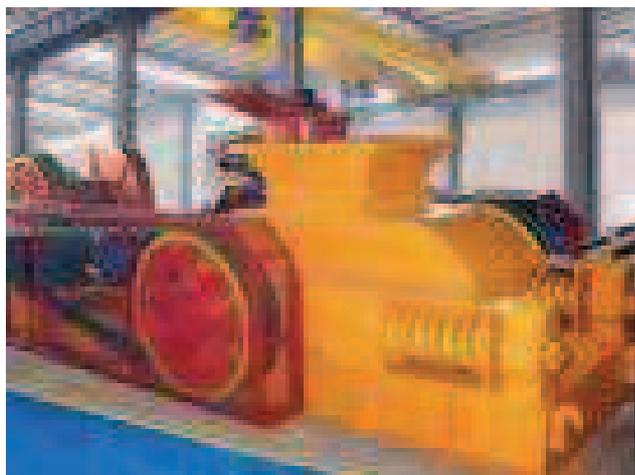


Figura 5 - Britador de Rolos

Fonte: Joyal Crusher (2010).

e) Moinho de Martelo – Possuem câmaras de britagem e martelos de impacto que esmagam o material, são providos de uma grelha na boca de saída, fazendo com que os agregados de grandes dimensões fiquem no compartimento de britagem. Produz grande quantidade de finos, razão pela qual é pouco utilizado.



Figura 6 - Britador de Martelo

Fonte: Czzycd (2010).

Quanto aos tipos de circuitos utilizados para britagem, segundo Ballista (2003), podem ser abertos ou fechados. No circuito aberto, o material passa pelo britador uma única vez, independentemente de requisitos de granulometria. No circuito fechado, por sua vez, os materiais passam continuamente pelo britador até atingirem o tamanho máximo desejado, conforme se pode ver na Figura 6. Para tanto, faz-se uso de peneiras que têm a função de retornar ao circuito os materiais com diâmetro acima do máximo desejado.



Figura 7 - Circuito fechado de britagem

Fonte: Ballista (2003).

2.2.3.4 Separação por Tamanho

Esta operação unitária realiza a separação das partículas através de peneiras ou classificadores.

O processo de peneiramento pode ser realizado a seco ou a úmido, conforme Spottiswood (1982) apud Angulo (2005) o processo a úmido é utilizado para obter uma separação mais eficiente da fração fina da graúda.

Existem também os classificadores pneumáticos que separam as partículas leves através de uma corrente de ar ascendente.

2.2.3.3 Concentração

Conforme Angulo et. al., (2003) podem ser realizadas diversas operações unitárias, como catação, separação magnética, separação em meio denso e flotação, as quais removem os contaminantes através da diferença de propriedades físicas, elétricas, magnéticas, densidade e forma.

2.2.3.4 Operações Auxiliares

As principais são transporte, secagem e homogeneização por meio de pilhas de acordo com Chaves (1996) apud Angulo (2005).

2.2.4 Características dos agregados reciclados de concreto

Nos próximos parágrafos serão relacionadas às características importantes dos agregados reciclados de concreto:

a) Granulometria

A granulometria de partículas sólidas compreende a determinação do tamanho das mesmas, bem como da frequência com que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho. Esta característica influencia a trabalhabilidade, o consumo de cimento e a resistência mecânica, possuindo papel fundamental na dosagem dos concretos.

De acordo com a ABNT NBR 15116:2004, existe a possibilidade de correção da curva granulométrica dos agregados reciclados, sendo recomendada a utilização de agregados convencionais. Conforme Lima (1999), o material reciclado pode ser peneirado, visando à obtenção de uma curva granulométrica similar as da areia e britas convencionais.

Van Acker (1996) apud Gonçalves (2001) realizou pesquisa sobre resíduos de concreto provenientes de indústria de pré-fabricados (elementos rejeitados, finais de linhas de produção, etc), utilizando algumas dosagens que se diferenciavam pela porcentagem de agregados reciclados e tipo de agregado usado (miúdo, graúdo ou ambos). O autor concluiu que a granulometria do agregado reciclado ficou bastante variada quando comparada ao natural, sendo percebido que durante o processo de peneiramento a argamassa aderida ao agregado reciclado se solta e gera uma quantidade significativa de finos.

O autor Gómez-Sóberon (2002) em pesquisa com agregados reciclados de concreto encontrou valores para o módulo de finura inferiores para o agregado graúdo reciclado quando comparado ao natural.

Em análise granulométrica, realizada por Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001) em uma amostra de agregado graúdo reciclado de concreto, foi verificado que 80% do material encontrava-se retido na peneira de malha 6,3mm.

Os autores Domingo-Cabo et. al., (2009) em caracterização dos agregados graúdos reciclados de concreto, utilizados na sua pesquisa, comparando ao natural, concluíram que os mesmos possuem curva granulométrica contínua, sendo que apenas uma fração inferior a 5% necessitou ser desclassificada, tornando-os adequados ao uso.

Já o autor Kathib (2005) que desenvolveu pesquisa com agregados miúdos reciclados de concreto, concluiu que a maior parte de seu material ficou retido na peneira de malha 2,36mm.

A composição granulométrica do agregado reciclado é uma propriedade relevante, indicando a quantidade de finos existente no material. Estes finos são oriundos da argamassa

que se desprende do agregado natural. Grande quantidade de finos no agregado pode causar efeito indesejável, pois pode consumir água da pasta do concreto.

b) Massa específica e massa unitária

A massa específica do agregado é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluídos os vazios permeáveis e a massa unitária é o quociente da massa do agregado lançado em um recipiente de volume conhecido.

Em pesquisa realizada por Gonçalves (2001) com agregados graúdos reciclados de concreto foi encontrado para massa específica seca e massa unitária os valores de $2,48\text{Kg/dm}^3$ e $1,29\text{Kg/dm}^3$ respectivamente. Valores semelhantes encontraram Xiao et. al., (2005) em seu trabalho, também com agregados graúdos reciclados de concreto, obtendo para massa específica o valor de $2,52\text{Kg/dm}^3$ e unitária de $1,29\text{Kg/dm}^3$. Os autores Chakradhara Rao, Bhattacharyya e Barai (2011) os quais caracterizaram agregados graúdos reciclados de concreto, utilizados em seu estudo para a fabricação de vigas, encontrando valores de massa específica de $2,47\text{Kg/dm}^3$ e massa unitária de $1,34\text{Kg/dm}^3$.

Os autores Padmini, Ramamurthy e Mathews (2009) realizaram estudo sobre as propriedades dos agregados graúdos reciclados de concreto oriundos de três concretos de diferentes resistências. A pesquisa avaliou três amostras de cada concreto, variando os tamanhos máximos dos agregados reciclados, analisando o montante total de nove amostras, sendo que os valores encontrados para massa específica variaram entre $2,38\text{Kg/dm}^3$ e $2,56\text{Kg/dm}^3$ e de massa unitária entre $1,32\text{Kg/dm}^3$ e $1,43\text{Kg/dm}^3$. Ao comparar os resultados encontrados pelos autores com o agregado natural utilizado conclui-se que a massa específica do agregado reciclado pode ter uma redução de até 15%, enquanto que os valores de massa unitária são praticamente os mesmos.

Complementando os autores anteriormente citados, Zaharieva et. al., (2003) e Xiao, Yuedong Sun e Falkner (2006) apresentaram em suas pesquisas agregados reciclados de concreto com massa específica e unitária menores que a dos naturais por eles utilizados.

Cabe observar a importância da propriedade massa específica dos agregados reciclados de concreto, pois um agregado reciclado de concreto de baixa massa específica não produz um concreto de elevada resistência, devido a uma maior presença de vazios (maior porosidade).

c) Absorção de Água

Devido ao agregado reciclado de concreto normalmente ser composto por uma fração de argamassa, ele apresenta uma maior porosidade do que o agregado natural, levando, geralmente, a uma maior absorção de água.

A absorção de água de agregados miúdos e graúdos reciclados de concreto foram realizadas por Poon et. al., (2002), obtendo-se valores de 14 e 7,5% respectivamente. Em estudo semelhante os autores Liu et. al., (2004), encontraram valores de absorção de água de 11,9% para o agregado reciclado miúdo e 7% para o graúdo.

Em pesquisa realizada com agregados graúdos reciclados de concreto Oliveira e Vazquez (1996) encontraram taxa de absorção de água de 7,6% para agregados de graduação de 5-10mm e 7,7% para agregados de graduação de 10-20mm. Já o autor Gómez-Soberón (2002) obteve para a mesma graduação de agregados graúdos reciclados, 6,81 e 5,83% respectivamente. Em pesquisas também realizadas com agregados graúdos reciclados de concreto, por vários autores, foram encontraram resultados semelhantes, Gonçalves (2001) obteve taxa de absorção de água de 4,90%, Xiao et. al., (2005) taxa de 9,25% e Rahal (2007) taxa de 3,47%

Já em pesquisas com agregados miúdos reciclados de concreto o autor Kathib (2005) obteve uma taxa de absorção de água de 6,25% e os autores Evangelista e Brito (2007) verificaram taxa de 13,10% para o mesmo tipo de agregado, confeccionado em laboratório, cuja curva granulométrica foi ajustada a dos agregados naturais.

Conforme Lima (1999), devido à possibilidade dos agregados absorverem a água destinada à hidratação do cimento e trabalhabilidade do concreto, existem autores que recomendam uma pré-molhagem do material reciclado para a produção do concreto ou argamassa. Oliveira e Vazquez (1996) também relatam que alguns autores aconselham que seja feita uma saturação, por imersão dos agregados em água antes da produção do concreto.

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

Devido a uma maior absorção de água do agregado reciclado de concreto ao comparar-se ao agregado natural deve existir uma compensação na demanda de água durante a dosagem dos novos concretos, sendo esta através do método de pré-molhagem do agregado

(saturando ou não o mesmo) ou pelo acréscimo de água na água de amassamento. Ao analisar-se o procedimento de produção de concreto em central dosadora ou indústria de pré-fabricados, a forma de aplicação que menos interfere na produção é introduzir a taxa de compensação de água juntamente à água utilizada no processo, apesar da recomendação existente na ABNT NBR 15116:2004.

2.2.5 Características dos concretos fabricados com agregados reciclados de concreto

Nos parágrafos que seguem serão listadas as propriedades dos concretos fabricados com agregados reciclados de concreto no estado fresco e endurecido:

2.2.5.1 Propriedades no estado fresco

a) Massa específica

Como visto em itens anteriores, os agregados reciclados geralmente possuem massa específica menor que a dos agregados naturais. Esta característica pode trazer como consequência uma menor massa específica para os concretos produzidos por estes agregados que a dos concretos produzidos com agregados naturais, tanto no estado fresco como no endurecido.

Os autores Gunçan e Topçu (1995) estudaram algumas propriedades do concreto reciclado, em sua pesquisa usando resíduos de um concreto com resistência aos 28 dias de 16 MPa, que após triturado e peneirado gerou o agregado graúdo reciclado. Eles realizaram uma variação do teor de substituição do agregado natural pelo reciclado de 30 a 100%. As suas principais conclusões foram: o valor da densidade do concreto reciclado diminui em relação ao do concreto natural no estado fresco de acordo com o aumento do grau de substituição, para os autores isto ocorre devido ao fato do agregado reciclado possuir uma grande quantidade de argamassa aderida.

Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001) confirmaram que a camada de argamassa de cimento aderida às partículas de agregado determina o desempenho do concreto confeccionado com os agregados reciclados. Segundo os autores, a argamassa residual presente altera a massa específica e pode ter efeito adverso no desempenho do concreto.

Estudando a massa específica dos concretos fabricados com agregados reciclados de concreto Gómez-Soberón (2002) obteve uma relação linear de decréscimo, chegando a 2 e 6%

para 100% de substituição. Os autores Kou e Poon (2009), em trabalho com agregados miúdos reciclados, perceberam esta tendência, ratificando o estudo realizado por Katz (2003), o qual obteve valores inferiores para o mesmo parâmetro, com uma maior redução, encontrando o valor de 12,4%.

Em virtude dos resultados encontrados na bibliografia é possível inferir que as massas específicas dos concretos, que incorporaram agregados reciclados de concreto na sua confecção diminuem. Este comportamento pode ser decorrente da argamassa aderida ao agregado, portanto esta característica tende a decrescer com o aumento do teor de substituição, pois a quantidade de argamassa introduzida nestes concretos também aumenta. Esta propriedade tem relação direta com a microestrutura do concreto, ou seja, com a zona de transição que apresenta características distintas do restante da pasta e que geralmente é mais fraca do que a pasta propriamente dita e que o agregado, exercendo, conseqüentemente, uma influência muito maior nas propriedades do material (GONÇALVES, 2001).

b) Trabalhabilidade

Dentre as propriedades do concreto no estado fresco, a trabalhabilidade pode ser considerada como uma das mais importantes, uma vez que a mesma exerce grande influência sobre as propriedades do concreto no estado endurecido.

Levy (1997) afirma que os concretos preparados com agregados reciclados apresentam consistência mais seca do que os concretos convencionais, preparados com a mesma relação água/cimento. A justificativa apresentada para esta tendência é a maior porosidade do agregado reciclado em relação ao agregado natural, o qual eleva a absorção de água da mistura.

Deve-se, no entanto, atentar também para a forma dos agregados. Agregados britados em tipos diferentes de equipamentos apresentam formas diferentes, conduzindo a áreas superficiais diferentes, o que também influencia na quantidade de água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade. Outro fato relevante é que, em geral, a massa específica dos agregados reciclados é menor que a dos agregados naturais, a substituição em massa destes por agregados reciclados conduz a um maior volume de agregados na mistura, o que também pode aumentar a quantidade de água requerida para a mesma trabalhabilidade. Como resultado desta situação tem-se uma fricção interna alta nos concretos confeccionados com agregados reciclados, exigindo maior quantidade de pasta, para que se tenha a mesma

trabalhabilidade dos concretos produzidos com agregados naturais (RAKSHVIR e BARAI, 2006).

O autor Topçu (1997) encontrou diminuição na trabalhabilidade dos concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto, sendo sua conclusão ratificada posteriormente em outro trabalho desenvolvido por Topçu e Sengel (2004), onde foi constatada uma redução na trabalhabilidade, medida pelo abatimento de tronco de cone, de 15 a 25% para o teor de 100% de substituição.

Em trabalho desenvolvido por Padmini, Ramamurthy e Mathews (2009), sobre a influência do concreto que deu origem ao agregado nas propriedades do concreto confeccionado com este material, foi observado que o tamanho do agregado possui relação direta com a trabalhabilidade do mesmo no estado fresco, pois quanto maior o tamanho máximo do agregado menor é absorção de água e melhor a trabalhabilidade.

Em pesquisa sobre o comportamento dos agregados reciclados de concretos para a confecção de vigas, onde foi realizado teste de impacto, os autores Chakradhara Rao, Bhattacharyya e Bara (2011) realizaram medida de abatimento de tronco de cone, concluindo pela necessidade de maior utilização de aditivo superplastificante para manter o mesmo abatimento do concreto referência. Este comportamento foi atribuído a uma maior absorção de água e a textura rugosa dos agregados reciclados de concreto.

Em virtude dos trabalhos desenvolvidos por vários autores, pode-se inferir que a característica de trabalhabilidade do concreto no estado fresco possui relação inversa à absorção de água do agregado reciclado de concreto e, portanto, a argamassa aderida ao material.

c) Tempo de pega e relação com a temperatura das reações de hidratação

Segundo Neville (1997), a pega se refere à mudança do estado plástico para um estado sólido. Embora, durante a pega a pasta adquira uma certa resistência, para efeitos práticos é importante distinguir pega de endurecimento, o qual se refere ao aumento da resistência de uma pasta de cimento depois da pega.

O começo da solidificação é chamado de início de pega e marca o ponto no tempo em que a pasta se torna não trabalhável. Conseqüentemente, o lançamento, compactação e acabamento do concreto, após este estágio, será muito difícil. A pasta não se solidifica repentinamente, necessita de um tempo considerável para se tornar totalmente rígida. O tempo

necessário para se solidificar completamente marca o tempo de fim de pega. Uma pasta de cimento Portland fresca tem pouca ou nenhuma resistência porque ela representa apenas o início da hidratação do C_3S (Silicato tricálcico), o principal composto presente. Uma vez que a hidratação do C_3S tem início, a reação continua rapidamente por muitas semanas. O processo de preenchimento progressivo dos espaços vazios na pasta, com os produtos de reação resulta no decréscimo da porosidade e da permeabilidade, e um acréscimo na resistência. Em tecnologia de concreto o fenômeno de resistência com o tempo é chamado de endurecimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Uma representação gráfica da relação entre a química do processo de hidratação de uma pasta de cimento Portland comum e os fenômenos físicos de enrijecimento gradual, pega e endurecimento com um decréscimo correspondente da porosidade e da permeabilidade são apresentados na Figura 8.

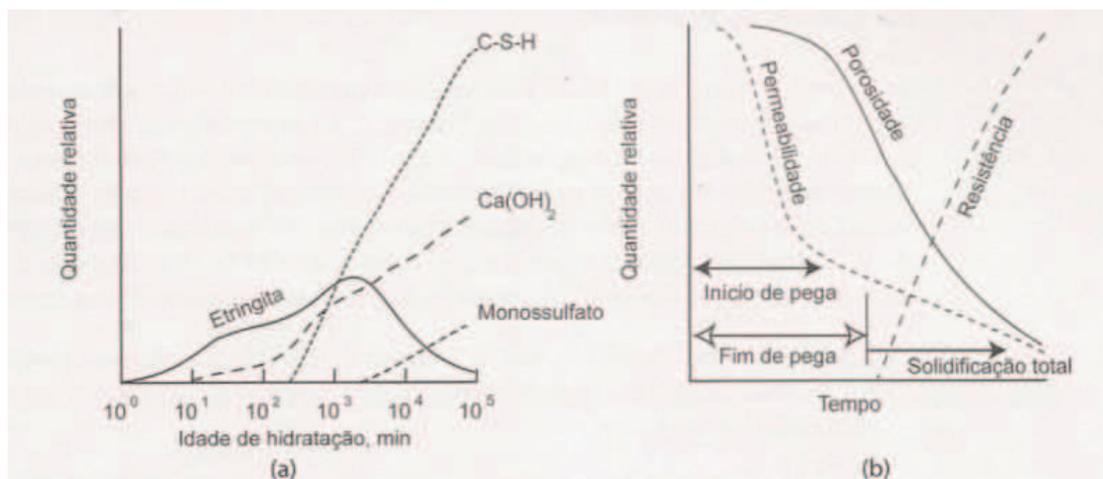


Figura 8 - (a) Curvas de velocidade típicas de formação de produtos hidratados em uma pasta de cimento Portland comum; (b) influência da formação de produtos hidratados no tempo de pega, porosidade, permeabilidade e resistência da pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Conforme Mehta e Monteiro (2008) a pega é devido à solidificação dos contatos da rede de grãos de cimento através do desenvolvimento de contatos entre as partículas individuais de cimento cobertas com produtos hidratados C-S-H. Portanto, a solidificação da estrutura aglomerada é promovida pela formação de hidratos próximos a zona de contato e pode ocorrer com apenas uma pequena porcentagem do volume total de cimento hidratado. A estrutura enrijecida torna-se cada vez mais mecanicamente irreversível, e um aumento da resistência da pasta neste estágio é proporcional à quantidade de hidratos precipitados.

As diversas reações de hidratação do cimento e a relação com a geração de calor é apresentada, esquematicamente, sob a forma das equações a seguir:



Sendo: C_3S , Silicato Tricálcico; C_2S , Silicato Dicálcico; $C-S-H$, Silicatos Hidratados; C_3A , Aluminato Tricálcico; C_4AF , Ferro Aluminato Tetracálcico; AF_t , Etringita e AF_m , Monossulfato.

Desta forma, a reação de hidratação do cimento portland abrange um conjunto de reações interdependentes de suas diferentes fases, com cinéticas diferentes, ao curso das quais os grãos de cimento anidro iniciais vão sendo progressivamente dissolvidos, dando origem a uma estrutura que incorpora as moléculas de água. Os produtos formados, em sua maioria, são os CSH, que por sua vez começam a formar uma matriz porosa coesiva. O desenvolvimento da reação de hidratação corresponde ao aumento progressivo do número de hidratos que formam o esqueleto poroso proporcionando o aumento da rigidez e da resistência do material. Devido a exotermia da reação de hidratação o calor total gerado fornece uma boa resposta macroscópica da evolução das reações químicas que envolvem a hidratação, apesar destas gerarem diferentes taxas de evolução de calor. Considera-se que o calor de hidratação gerado na hidratação completa de um cimento é aproximadamente uma função aditiva dos calores gerados na hidratação dos compostos individuais do cimento, ponderados pelos teores dos compostos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os concretos confeccionados com ARC podem possuir frações de cimento não hidratadas provenientes da argamassa que se encontra aderida ao agregado, podendo ocorrer uma alteração na hidratação da pasta de cimento do novo concreto. Em virtude do apresentado considera-se importante o estudo do efeito do agregado reciclado de concreto sobre a evolução da temperatura das reações de hidratação, justamente por não existirem pesquisas que tenham realizado este tipo de avaliação.

É importante observar que o início de pega é o início do endurecimento da pasta, sendo que o aumento da taxa da evolução da temperatura (°C) indica o início da hidratação do cimento, portanto, alterações nesta taxa podem representar eventuais alterações na pega do concreto.

2.2.5.2 Propriedades no estado endurecido

As propriedades do concreto no estado endurecido são subdivididas em mecânicas e de durabilidade, sendo estas listadas nos parágrafos que seguem:

2.2.5.2.1 *Propriedades mecânicas*

a) Resistência à compressão

Todos os materiais dos quais o concreto é composto afetam diretamente a sua resistência e o seu desempenho final. Assim, os agregados também são extremamente importantes para análise criteriosa das propriedades do concreto. Qualquer variação dos materiais componentes do concreto merece um estudo sistemático e isso também se aplica ao agregado reciclado, principalmente quando se pensa que eles correspondem a até 80% de toda a mistura.

Ao ser avaliado o efeito da quantidade de cimento e de argamassa aderida às partículas de agregado reciclado, nas propriedades dos concretos que incorporam esses agregados, concluiu-se que a qualidade do agregado reciclado de concreto influi significativamente na resistência à compressão. Pois, para concretos com agregados graúdos reciclados com grande quantidade de argamassa aderida, a resistência à compressão aos 28 dias foi cerca de 15% menor se comparada ao concreto de referência. Já para agregados reciclados que foram submetidos a um processo de abrasão, visando diminuir a quantidade de argamassa aderida à sua superfície, essa diferença ficou em torno de 6% (MONTGOMERY, 1998).

Vários trabalhos (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002, KATZ, 2003, ZAHARIEVA et. al., 2003, TOPÇU e SENDEL, 2004, XIAO et. al., 2005, RAKSHVIR e BARAI, 2006, XIAO e FALKNER, 2007) obtiveram conclusões semelhantes, apontando que a resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados geralmente é menor que a dos concretos produzidos com agregados naturais, para um mesmo consumo de cimento. Segundo dados dos referidos autores, essas reduções podem atingir até a ordem de 45% da resistência dos concretos de referência.

Os autores Sami e Akmal (2009), em pesquisa sobre a influência dos agregados reciclados de concreto sobre a propriedade de 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.

Quando a matriz do concreto produzido com agregados reciclados for menos resistente que o próprio agregado reciclado, este último não exercerá grande influência na resistência mecânica do concreto, uma vez que a matriz será o elo mais fraco do mesmo, portanto, muito possivelmente o concreto irá se romper na matriz. Entretanto, quando a matriz do concreto for mais resistente que o agregado reciclado, este último terá substancial influencia na resistência do concreto, uma vez que possivelmente o concreto romperá no agregado.

Geralmente, o agregado reciclado é menos resistente que o agregado natural, em função de suas características físicas, apresentando alta porosidade, absorção de água e uma baixa 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.

Para os autores Evangelista e Brito (2007), os quais produziram concretos com agregados miúdos reciclados de concreto, o teor de substituição ao agregado natural de até 30% não afeta a propriedade de resistência à compressão, sendo este concreto indicado para fins estruturais.

Segundo Cabral (2007), em pesquisa desenvolvida com RCD misto, 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, metacaulim, escória de aciaria, de alto-forno ou de cobre) e aditivos super-plastificantes. Uma outra maneira de se compensar a perda na resistência é simplesmente forçar uma diminuição na relação água/cimento dos concretos com agregados reciclados implicando em um maior consumo de cimento.

Existe outra técnica para elevar a resistência que é o método de mistura dos constituintes do concreto chamado de *double-mixing*, onde a diferença para o método tradicional é que a água é adicionada em duas etapas. O objetivo deste método é fazer com que os agregados reciclados tenham contato primeiramente com uma argamassa de baixa relação água/cimento, sendo envolvidos por uma camada desta argamassa, obtendo assim melhores propriedades na zona de transição (CABRAL, 2007).

Verificou-se que a maioria das pesquisas desenvolvidas com agregados reciclados apontam no sentido de diminuição da resistência, relacionando esta propriedade com o teor de substituição e com a resistência do agregado.

b) Resistência à tração

A resistência à tração dos concretos geralmente se apresenta 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.

Para a resistência à tração a substituição dos agregados naturais pelos reciclados provoca uma redução na mesma, embora esta pareça ser menos intensa que as reduções provocadas na resistência à compressão.

Coerente com isto, vários autores obtiveram reduções na resistência à tração em valores de 6 a 15%, para concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002 e TOPÇU e SENDEL, 2004).

Ratificando as pesquisas anteriores os autores Grdic et. al., (2010) encontraram diminuição na propriedade de resistência à tração por compressão diametral, estas diminuições foram na ordem de 2,49 e 13,95% para a substituição de 50 e 100% de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto.

Já para Katz (2003), as perdas encontradas foram maiores, semelhantes as que ocorreram na resistência à compressão, na ordem de 23 a 41%.

Na pesquisa desenvolvida com agregados miúdos reciclados de concreto pelos autores Evangelista e Brito (2007), concluiu-se que a resistência à tração é reduzida, obtendo-se valores aceitáveis para teores de substituição de até 30%.

Contudo, existem trabalhos que apresentam pequenos acréscimos em tal propriedade em concretos confeccionados com agregados reciclados de concretos, como no estudo desenvolvidos pelos autores Etxeberria, Vázquez e Barra (2007).

A autora Leite (2001), a qual desenvolveu pesquisa com agregado reciclado misto, obteve conclusões sobre a propriedade de resistência à tração que também se aplicam ao agregado reciclado de concreto, observando que a mesma leva em consideração mecanismos de aderência física entre as partículas, sendo que o uso dos agregados reciclados promove uma boa aderência entre a pasta e o agregado em virtude de sua forma mais irregular e rugosa, portanto, a zona de transição do concreto confeccionado com agregados reciclados é muito boa.

2.2.5.2.2 *Propriedades de durabilidade*

Cada vez mais presente nas discussões acerca das exigências dos concretos, a durabilidade é dada por um conjunto de fatores, considerando as suas propriedades físicas, químicas e o ambiente ao qual está exposto.

De acordo com o AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - Committee 201 (2001), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataque químico, abrasão, ou qualquer outro processo de deteriorização. Segundo Mehta e Monteiro (2008), um concreto durável preservará sua forma, qualidade e capacidade de uso originais quando exposto ao ambiente de uso para o qual foi projetado.

A estrutura será considerada durável quando desempenhar as especificações de projeto, mantendo resistência e utilidade com segurança durante um período de tempo predeterminado, pelo menos razoável. Este tempo é definido como a vida útil da estrutura e, segundo a ABNT NBR 6118:2007, é aquele período de tempo em que as características originais da estrutura de concreto são mantidas sem que haja necessidade de manutenções e reparos, além daquelas originalmente já estabelecidas. Este conceito está ligado ao ato de planejar, projetar, construir, utilizar e manter uma estrutura, o que, por outro lado, traz consigo o que chamamos de medida de desempenho.

Quanto se trata do desempenho de uma estrutura, entende-se como a avaliação do seu comportamento durante sua vida útil. Uma estrutura de concreto terá seu desempenho julgado melhor ou pior, dependendo de como foi seu comportamento mediante as condições de projeto e utilização que lhe foram impostas.

Atualmente, é perfeitamente aceitável que critérios de durabilidade sejam especificados de forma bastante clara no projeto de estruturas de concreto sujeitas às mais diversas condições de exposição. Somado a isso, existe a consciência de que é preciso preservar os recursos naturais através da produção de materiais e componentes com vida útil mais longa ou a produção de materiais alternativos, como os agregados reciclados.

Mas para que esses materiais alternativos sejam amplamente utilizados há uma necessidade de conhecer o seu comportamento diante de condições que afetem negativamente as propriedades do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a permeabilidade é, sem dúvida alguma, a principal propriedade frente à durabilidade de concretos, sejam convencionais ou reciclados. As degradações químicas como a carbonatação, ataques por sulfatos e cloretos, etc., são proporcionais à permeabilidade do concreto.

Conforme Ferreira (2006), existem, genericamente, duas estratégias para abordar um projeto de durabilidade. A primeira estratégia consiste em evitar a degradação da estrutura isolando a agressividade do meio envolvente. A segunda estratégia consiste em selecionar e aplicar composições de materiais e detalhes estruturais para resistir, durante um período de uso específico, à degradação da estrutura.

De uma forma geral, a durabilidade de concretos, sejam eles naturais ou reciclados, incide diretamente na facilidade ou dificuldade do transporte de fluídos dentro do concreto, sendo classificado como um concreto pouco ou muito permeável. Os principais agentes de transporte de fluído no concreto são a água, que pode estar pura ou conter agentes agressivos, como o dióxido de carbono e o oxigênio.

Ao analisar o desempenho de concretos, feitos com agregados naturais e reciclados de concreto, em relação à propriedade de absorção de água, os pesquisadores Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001) comprovaram em seus resultados que os resíduos de argamassa que ficam aderidos ao agregado natural, e que compõem o ARC, propiciam aumento do teor de água absorvido pelo concreto em torno de 25% a mais de absorção em relação ao concreto de referência.

Segundo Troian (2010), em pesquisa desenvolvida sobre análise de desempenho de concretos, frente à penetração acelerada de íons cloreto, em matrizes confeccionadas com agregado reciclado de concreto, concluiu-se que ocorre aumento da carga total passante quando comparados ao concreto referência.

Na avaliação da durabilidade, com ênfase a carbonatação, realizada por Werle (2010), observou-se que a velocidade de carbonatação diminui à medida que é aumentada a resistência do agregado reciclado de concreto incorporado à nova matriz de concreto, ao comparar-se às amostras referência. De acordo com a autora este comportamento possui relação com a porosidade do agregado reciclado.

a) Absorção de Água

A durabilidade das estruturas de concreto está intimamente ligada à sua permeabilidade, que é função da absorção de água do concreto no estado endurecido.

Geralmente os concretos confeccionados com agregados reciclados são caracterizados por uma alta percentagem de meso e macro poros, sugerindo assim uma porosidade com maior tendência à absorção de água e a lixiviação, do que os preparados com agregados naturais (SANI et. al., 2005).

Segundo estudos realizados por Gómez-Soberón (2002) a distribuição dos poros em concretos com substituição do agregado natural pelo reciclado é modificada, sendo mais sentida para altos teores de substituição. O autor encontrou valores de taxa de absorção de água até 14,3% maiores nos concretos confeccionados com agregados reciclados, quando comparados aos confeccionados com agregados naturais. Coerente com isto os pesquisadores Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001) e Katz (2003) encontraram taxa de absorção de água de 25 e 89%.

Para os concretos produzidos com agregados reciclados de concreto a porosidade parece aumentar à medida que se aumenta o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, pois gradativamente, o teor de pasta no concreto é aumentado, e assim conseqüentemente, o volume de poros, uma vez que o agregado reciclado é claramente mais poroso que o natural (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002 e ETXEBERRIA, VÁZQUEZ e MARÍ, 2006).

Em pesquisa realizada com substituição de agregado miúdo por reciclado de concreto foi observado que a propriedade de absorção de água no método por imersão aumenta à medida que aumenta o teor de substituição, chegando ao valor máximo de 46% para o concreto confeccionado com 100% de agregado miúdo reciclado. Já para o ensaio de absorção de água realizado por capilaridade, o efeito da substituição é mais negativo, chegando ao índice de 70,3% para a substituição completa (EVANGELISTA e BRITO, 2010). Os autores

desta pesquisa concluíram que em ambos os casos a absorção de água aumenta linearmente com o aumento do teor de substituição, efeito este esperado, devido à estrutura da nova matriz de concreto confeccionada ser mais porosa devido ao agregado reciclado de concreto.

Em virtude das referências investigadas e devido a pesquisas desenvolvidas nesta instituição de ensino, conforme Werle (2010) e Troian (2010), conclui-se que a propriedade de absorção de água aumenta para os concretos confeccionados com agregado reciclado de concreto, este comportamento deve-se ao fato do agregado reciclado ser mais poroso que o natural, característica esta relacionada diretamente a argamassa aderida ao material.

2.3 PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO

É cada vez maior a utilização de peças pré-fabricadas de concreto na construção civil, pois representa um razoável progresso em termos construtivos, permitindo a racionalização e o aperfeiçoamento técnico das obras. A indústria de pré-fabricados incorpora os conceitos de linha de montagem da indústria de base e de bens de consumo, racionalizando o uso dos materiais, da mão de obra e trazendo a necessidade de controlar e garantir a qualidade (PSQ, 2003).

Conforme manual da Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto - ABCIC (2003), cada material ou sistema construtivo tem suas próprias características, as quais de forma maior ou menor influenciam a tipologia, o comprimento do vão, a altura da edificação, os sistemas de contraventamento, etc. Isso também ocorre no caso dos sistemas construtivos em concreto pré-fabricado, não apenas em comparação com as estruturas de aço, de madeira e de alvenaria, mas também em relação ao concreto moldado no local. Teoricamente, todas as juntas e ligações entre os elementos pré-fabricados deveriam ser executadas de modo que a estrutura tivesse novamente o mesmo conceito monolítico de uma estrutura moldada no local.

Os autores Shen, Tam e Li (2009), em estudo comparativo entre lajes de concreto pré-fabricadas e as concretadas na obra, apresentam inúmeros benefícios a respeito da pré-fabricação, concluindo sobre a sustentabilidade do método construtivo pela diminuição de resíduos gerados, diminuição do tempo da obra e redução considerável do custo.

A pesquisa desenvolvida por Jaillon e Poon (2009), observando alguns estudos de caso sobre a evolução dos sistemas pré-fabricados de edifícios residenciais em Hong Kong, apresentou como vantagens do sistema da pré-fabricação a diminuição de resíduos de construção gerados na obra, a diminuição do consumo de água, a redução do tempo de

construção, o aumento da produtividade, o gerenciamento mais fácil das questões de qualidade e o controle de projeto. Este estudo também concluiu sobre algumas desvantagens da pré-fabricação, tais como: limitação na dimensão dos elementos pré-fabricados, dificuldade de transporte e elevação das peças, falta de área para armazenamento no local destes elementos.

Os autores citados destacam a diminuição da geração de resíduos como uma das principais vantagens do sistema produtivo utilizado na pré-fabricação, associando este método diretamente a idéia de sustentabilidade.

A utilização dos pré-fabricados em obras de pequeno porte, como casas populares ou de interesse social, pode ser viabilizada, já que há uma grande repetição dos elementos podendo ocorrer ganhos com a racionalização dos materiais, reduções de tempo e de mão-de-obra. Neste sistema construtivo, o desperdício é substituído pela execução planejada, padronizada e com grande qualidade final. A utilização de fôrmas reaproveitáveis, que não geram entulho, e de recursos industrializados resultam em um maior controle do impacto ambiental da obra. A metodologia é baseada em processos industrializados, onde a rapidez e a qualidade devem ser monitoradas constantemente para garantir os prazos e os custos projetados.

Segundo manual da ABCIC (2003) este método construtivo é menos agressivo ao meio ambiente, pois a indústria de concreto pré-fabricado reduz a utilização de materiais em até 45%; o consumo de energia em até 30%; diminuindo o desperdício com a demolição em até 40%. Sendo que o manual observa ainda, que muitas industriais estão reciclando o desperdício do concreto, tanto o endurecido quanto o fresco, salientando que no futuro as empresas de pré-fabricados funcionarão como um sistema de produção fechado, onde todo o material gasto será processado e novamente utilizado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os parágrafos a seguir descrevem o programa experimental desenvolvido na pesquisa.

3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

O programa experimental contemplou as atividades executadas na indústria de pré-fabricados em concreto e no Laboratório de Materiais da Construção Civil localizado na Universidade do Vale do Rio dos Sinos, município de São Leopoldo/RS. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, absorção de água e monitoramento da evolução da temperatura das reações de hidratação das novas matrizes de concreto, confeccionadas com agregado reciclado de concreto. Os ensaios foram realizados em concretos convencionais com traços desenvolvidos em laboratório e com teor de substituição de 50% em volume de agregados graúdos naturais pelos reciclados, oriundos de resíduos da indústria de pré-fabricados em concreto. A investigação experimental foi dividida em três etapas que objetivaram a obtenção dos resultados e conclusões finais, colaborando para as respostas dos questionamentos balizadores no início do estudo.

A primeira etapa consistiu na montagem de diagnóstico simplificado, com uma caracterização focada na geração de resíduos de concreto da indústria de pré-fabricados, localizada no município de Porto Alegre. A meta desta etapa foi determinar quais os tipos de resíduos gerados em maior escala, de forma rotineira, dentro da indústria, apontando os resíduos que apresentam maior potencialidade para reciclagem.

Na segunda etapa do estudo foram realizados ensaios de caracterização dos resíduos de concreto gerados pela indústria, os quais posteriormente foram utilizados como agregado graúdo reciclado em substituição ao agregado graúdo natural, na produção de novos concretos. Realizaram-se ensaios de análise de resistência à compressão, absorção de água, massa específica e unitária, granulometria e forma do grão do concreto cominuído na dimensão de agregado graúdo.

A terceira etapa foi destinada à produção dos concretos de referência nos traços estipulados e os concretos com resíduos, com teor de 50% de substituição de agregado graúdo natural por reciclado de concreto, seguida pela execução dos ensaios mecânicos e de durabilidade no estado endurecido e monitoramento da evolução da temperatura das reações de hidratação das novas matrizes. Salienta-se que todos os ensaios, bem como a produção dos

novos concretos, foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, município de São Leopoldo/RS.

3.2 FATORES DE CONTROLE E VARIÁVEIS DE RESPOSTA

Este estudo pretende avaliar a influência do ARC, em diversos traços de concreto, nas propriedades mecânicas, (resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral), de durabilidade (absorção de água), no estado endurecido, e o monitoramento da evolução da temperatura das reações de hidratação dos concretos, sendo a pesquisa realizada nas novas matrizes de concreto confeccionadas.

Portanto, as variáveis envolvidas na pesquisa em questão foram:

Fatores de controle variáveis

- **Tipo de Agregado** - Natural, utilizado como referência e Agregado Reciclado de Concreto (ARC), oriundo do resíduo de concreto seco, submetido ao processo de cura convencional (RCC) e submetido ao processo de cura térmica com vapor d'água (RCT). Para fins de análise de variância e tratamento estatístico dos dados pelo método de regressão múltipla não-linear este fator terá os níveis dos agregados relacionados à absorção de água dos mesmos;

- **Relação a/c** - Com níveis definidos como x, y e z. Para verificação do comportamento dos agregados em três níveis diferentes de resistência;

- **Idade de cura** - Os corpos de prova foram mantidos durante 28 dias em processo de cura em câmara úmida, segundo procedimentos e recomendações de normas pertinentes, sendo que o ensaio de resistência à compressão axial foi realizado também para as idades de 7 e 63 dias.

Fatores de controle fixos

- **50% de teor de substituição de agregado graúdo natural pelo reciclado de concreto** - O teor de substituição estipulado foi baseado em estudos previamente existentes (TROIAN, 2020 e WERLE, 2010) sobre a substituição de agregado graúdo natural pelo reciclado de concreto, sendo verificado que maiores teores de substituição geram concretos de menor resistência;

- **Tipo de cimento Portland, CP V-ARI** - o mesmo utilizado na indústria de pré-fabricados, local de origem dos resíduos de concreto;

- **Cura** - o processo de cura dos concretos confeccionados foi o de cura em câmara úmida, seguindo procedimentos e recomendações de normas pertinentes. Cabe observar que ocorreram variações de umidade relativa do ar e temperatura durante a preparação dos corpos de prova dos novos traços de concreto, isto ocorreu devido à sala de preparação das amostras não ter ambiente controlado;

Variáveis de resposta

Estas variáveis referem-se às propriedades que foram medidas para avaliação dos concretos com substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado de concreto no estado endurecido:

- **Resistência à compressão axial** – para os três níveis de relação a/c (x, y e z) nas idades de 7, 28 e 63 dias, com resultados expressos na unidade de MegaPascal (MPa);

- **Resistência à tração por compressão diametral** - para os três níveis de relação a/c, (x, y e z) na idade de 28 dias, com resultados expressos na unidade de MegaPascal (MPa);

- **Absorção de água por capilaridade** - para os três níveis de relação a/c, (x, y e z) na idade de 28 dias, os resultados foram expressos na unidade de g/cm^2 , sendo o ensaio executado conforme norma da RILEM TC 166-PCD;

- **Temperatura das reações de hidratação** – para os três níveis de relação a/c, (x, y e z), os resultados foram expressos em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ao longo do tempo (min), sendo o ensaio executado conforme norma da RILEM TC 119 TE.

3.3 ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso foi desenvolvido em indústria de pré-fabricados em concreto localizada no município de Porto Alegre/RS. A empresa tem sua produção subdividida em três fábricas 1, 2 e 3, cada uma responsável pela moldagem de um determinado tipo de peça, utilizando traços pré-definidos de concreto. A fábrica 1 confecciona peças pré-fabricadas, em concreto seco vibro-prensado (estacas e lajes alveolares) e convencional plástico (gradis), a fábrica 2, peças em concreto plástico convencional (pilares, vigas, escadas, painéis, entre outros) e a fábrica 3, realiza a dobradura das armaduras de aço e a fabricação de peças diversas em concreto convencional (vigas, terças e peças em geral).

Com a finalidade de sugerir melhorias no sistema de gerenciamento de resíduos desta indústria de pré-fabricados em concreto, prevendo-se a possibilidade de reciclagem dos

resíduos gerados no próprio processo produtivo, foi verificada a geração dos mesmos na indústria. Optou-se inicialmente pela tentativa de segregação dos resíduos no interior da indústria, com o armazenamento dos diferentes concretos em tambores metálicos, com auxílio dos funcionários. Os encarregados de cada setor receberam palestra com a finalidade de entendimento do projeto, para que colaborassem na segregação dos materiais. Esta metodologia não obteve êxito devido a diversos fatores: dificuldade de colaboração dos funcionários, os quais misturavam os materiais, dificuldade de logística no interior da empresa para carregamento dos tambores e falta de espaço físico.

Em virtude da experiência mal sucedida, de separação dos materiais dentro da indústria para verificação das quantidades de resíduos gerados através do volume, foi criada nova metodologia.

A nova metodologia adotada para quantificação dos resíduos gerados, foi baseada na verificação dos primeiros 5 dias úteis de cada mês na indústria, durante o período de 5 meses. Observou-se nos projetos (croquis) o tamanho das peças confeccionadas e o volume de concreto necessário, sendo levantada a quantidade de concreto produzida na central dosadora da empresa, por traço, concluindo-se que a diferença entre estes valores seria a geração de resíduos. A Tabela 7 apresenta os valores da geração de resíduos nos cinco primeiros dias úteis do mês, pelo período de cinco meses do ano de 2010.

Tabela 7 – Quantificação dos resíduos gerados na indústria de pré-fabricados.

Concreto	Geração de resíduos (m ³ /mês)					Total Produção (m ³ /mês)	Total de Resíduo (m ³ /mês)	% Resíduo/ Produção
	1º	2º	3º	4º	5º			
1 (RCC)	3,4	1,40	0,84	4,03	3,88	466,56	13,55	2,90
2	0,31	0,45	0,70	0,30	0,25	173,75	2,04	1,17
3	0,74	0,50	0,15	0,15	0,3	176,25	1,84	1,04
4 (RCT)	0,15	3,68	4,86	0,94	1,11	1000,6	17,5	1,17
5	0	0	0	0	0	72,5	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0,78	0,27	0	0	81,25	1,05	1,29
8	0	0	1,44	0	0	104,00	1,44	1,38

Onde: RCC=Resíduo Cura Convencional; RCT=Resíduo Cura Térmica.

A partir do levantamento realizado concluiu-se que os dois resíduos gerados em maior quantidade pela empresa são os resíduos de concretos submetidos à cura convencional, ao ar, utilizado para a fabricação de lajes alveolares de 15cm de altura e os resíduos de concreto submetidos à cura térmica, a vapor de água, utilizados para a fabricação das estacas. Estes resíduos são confeccionados na fábrica 1, sendo oriundos das peças fabricadas em maior escala pela indústria de pré-fabricados.

1.4 MATERIAIS

Os materiais utilizados na realização deste programa experimental foram provenientes da indústria de pré-fabricados em concreto.

3.4.1 Cimento CP V-ARI

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), proporcionando rápida hidratação, sendo o mesmo utilizado na indústria de pré-fabricados em concreto. As propriedades do cimento CP V-ARI, fornecidas pelo fabricante, encontram-se na Tabela 8 e de maneira geral atendem as especificações das respectivas normas.

Tabela 8 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI.

Propriedades Químicas do CP V-ARI		
Composição química do cimento		Resultados (%)
Dióxido de Silício (SiO ₂)		18,48
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)		4,05
Óxido de Cálcio (CaO)		59,68
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)		2,53
Óxido de Magnésio (MgO)		5,24
Óxido de Enxofre (SO ₃)		3,05
Perda ao fogo		3,23
CaO Livre		0,91
Resíduos insolúveis		0,65
Equivalente alcalino		0,64
Propriedades físicas e mecânicas do CP V-ARI		
Expansibilidade a quente (mm)		0,80
Tempo de pega (min)	início	2:42
	fim	3:18
Consistência Normal		28,7
Blaine		4,341
Retido na # 200		0,40
Retido na # 325		3,00
Massa Específica (g/cm ³)		20,8
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	3,12
	3 dias	34,6
	7 dias	41,7
	28 dias	51,3

Fonte: Cimento Itambé, consulta do lote em 2 de agosto de 2010.

3.4.2 Agregados

3.4.2.1 Miúdo natural

No programa experimental foi utilizada areia de origem quartzosa, fornecida pela indústria de pré-fabricados, sem informação da procedência. Todo o material foi previamente seco em estufa a 100°C por período de 7 dias. Nas Tabelas 9 e 10 são apresentadas as características granulométrica e físicas do agregado miúdo. A curva da composição granulométrica é apresentada na Figura 9, estando dentro da zona utilizável.

Tabela 9 - Características granulométricas¹ do agregado miúdo.

Peneiras (mm)	% retido	% retido acumulado
4,8	3	3
2,4	11	14
1,2	18	32
0,6	18	50
0,3	27	77
0,15	20	97
0,075	3	100
< 0,15	0	100
Módulo de finura	2,73	

¹ NBR NM 248 (ABNT, 2003)

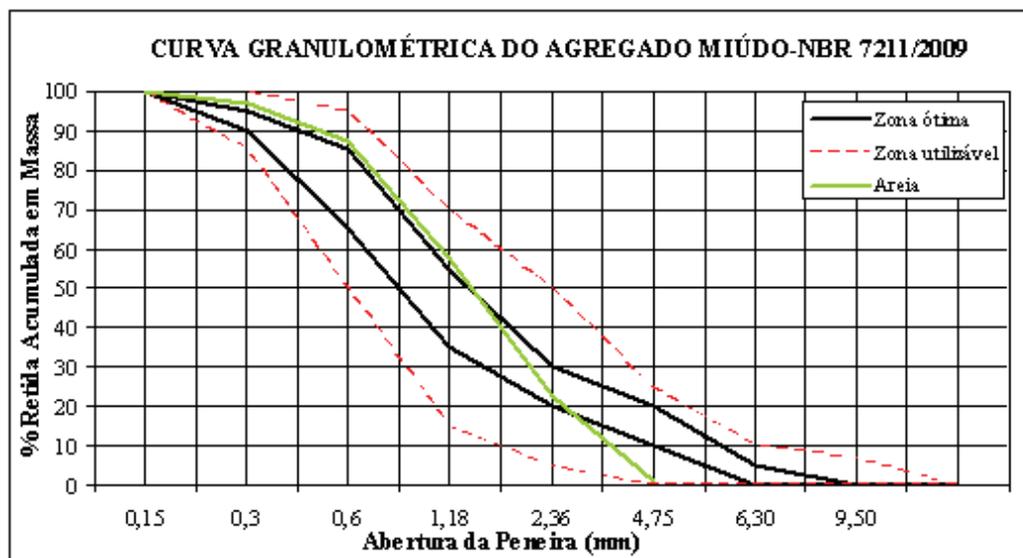


Figura 9 - Curva da distribuição granulométrica da areia.

Tabela 10 - Características físicas dos agregados miúdos naturais, areia.

Propriedades físicas do agregado miúdo natural	
Massa Unitária (g/cm ³) ¹	1,53
Massa Específica (g/cm ³) ²	2,55

¹ ABNT NBR NM 45:2006; ² ABNT NBR NM 52:2009.

3.2.4.2 Graúdo natural

O agregado graúdo empregado no experimento é de origem basáltica, proveniente do estado do Rio Grande do Sul, sendo o mesmo utilizado pela indústria de pré-fabricados em concreto.

Este material foi caracterizado granulometricamente conforme norma da ABNT NM 248:2003, passando pelo processo de lavagem, para remoção de finos aderidos aos grãos para sua caracterização, sendo a composição apresentada nas Tabelas 11 e 12. Para utilização do material e confecção dos corpos de prova, o mesmo passou por processo de secagem a temperatura ambiente.

Tabela 11 - Composição granulométrica¹ do agregado graúdo natural (AGN), brita 0.

Peneiras (aberturas)	% em massa	
	Retida	Acumulada
	Brita 0	
9,5mm	4	4
6,3mm	48	52
4,75mm	30	82
2,36mm	18	100
1,18mm	0	100
0,6mm	0	100
0,3mm	0	100
0,15mm	0	100
<0,15mm	0	100
Total	100	100
Módulo de Finura		5,86
Dimensão Máxima Característica (mm)		9,5

¹ ABNT NBR NM 248:2003.

Tabela 12 - Composição granulométrica¹ do agregado graúdo natural (AGN), brita 1.

Peneiras (aberturas)	% em massa	
	Retida	Acumulada
	Brita 1	
19,0mm	0	0
12,5mm	62	62
9,5mm	38	92
6,3mm	8	100
4,75mm	0	100
2,36mm	0	100
1,18mm	0	100
0,6mm	0	100
0,3mm	0	100
0,15mm	0	100
< 150µm	0	100
Total	100	100
Módulo de Finura		6,92
Dimensão Máxima Característica (mm)		12,5

¹ ABNT NBR NM 248:2003.

Em virtude da execução do ensaio de massa unitária, conforme descrito a seguir, optou-se pela realização de uma composição do agregado graúdo reciclado, 40% brita0 e 60% brita1, sendo realizada a granulometria para esta composição, considerando somente a fração de interesse, ou seja, o material retido entre as peneiras 19,00mm e 4,75mm, Tabela 13.

Tabela 13 - Composição granulométrica¹ dos agregados graúdos naturais (AGNs), 40%b0 e 60%b1.

Peneiras (aberturas)	% em massa	
	Retida	Acumulada
	Brita 1	
19,0mm	0	0
12,5mm	21,33	21,33
9,5mm	27,35	48,68
6,3mm	37,02	85,70
4,75mm	9,78	95,48
<4,75mm	4,52	100
Total	100	100
Dimensão Máxima Característica (mm)		12,5

¹ ABNT NBR NM 248:2003.

A curva da distribuição granulométrica do agregado graúdo natural composto será apresentado comparativamente ao do agregado graúdo reciclado de concreto (RCC/RCT) utilizado na confecção dos corpos de prova.

Para determinação da composição do agregado graúdo natural, brita 1 (b1) e brita 0 (b0), utilizado nos novos concretos confeccionados, foram realizados ensaios de massa unitária para as seguintes proporções: 30%b0-70%b1; 40%b0-60%b1; 50%b0-50%b1;

60%b0-30%b1; 70%b0-30%b1, concluindo-se que a maior massa unitária compactada foi à apresentada na faixa de 40%b0-60%b1, sendo esta apresentada na Tabela 14.

Os ensaios de massa específica e massa unitária seguiram respectivamente as normas ABNT NBR NM 52:2009 e ABNT NBR NM 45:2006–Método “B”, sendo os resultados apresentados na Tabela 14. A determinação da massa específica para a amostra de proporção 40%b0-60%b1 foi realizada com base na verificação da maior massa unitária.

Tabela 14 - Características físicas do agregado graúdo natural, na proporção utilizada, 40%b0 e 60%b1.

Propriedades físicas do agregado graúdo natural	
Massa Unitária (g/cm ³) ¹	1,57
Massa Específica (g/cm ³) ²	2,40

¹ABNT NBR NM 45:2006; ²ABNR NBR NM 53:2002.

Após a determinação da composição granulométrica do agregado graúdo natural, foi realizada a medição da forma do grão na composição descrita, 40%b0/60%b1, de acordo com a ABNT NBR 7809:2006 e ABNT NBR 7221:2009, a medição foi executada com paquímetro digital nas três dimensões, largura, comprimento e altura. O número de grãos medidos foi determinado pela quantidade de massa retida em cada peneira da análise granulométrica, variando da peneira #12,5mm a #2,36mm, não existindo retenção superior à peneira 12,5mm. O índice de forma do grão foi determinado pela relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado natural, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica, sendo este índice inferior a 3.

3.4.3 Água

A água utilizada para mistura dos insumos é potável, proveniente da rede de abastecimento municipal de São Leopoldo/RS.

3.4.4 Aditivo

O aditivo utilizado nas dosagens é um superplastificante da marca MC Power Flow 1059 - Mc Bauchemier, sendo fornecido pela indústria de pré-fabricados, as características do aditivo foram fornecidas pelo fabricante, conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Características do aditivo superplastificante fornecidas pelo fabricante.

Função	Aditivo superplastificante sintético de polímeros policarboxilatos para concreto.
Base química	Lignosulfonatos e Aditivos especiais
Aspecto	Líquido
Cor	Marrom
Densidade (g/cm ³)	1,06
Dosagem Recomendada	0,2 a 5,0% sobre o peso do cimento
Teor de Cloretos	< 0,1%
Teor de Alcalis	< 1,0%

Fonte: MC Bauchimier.

3.4.5 Cinza volante

A cinza volante foi utilizada em adição de 15% em relação à massa de cimento, seguindo a prática do sistema produtivo da indústria de pré-fabricados, oriunda de um único lote².

3.4.6 Agregado reciclado de concreto (ARC)

Os resíduos de concreto utilizados no programa experimental foram confeccionados na indústria de pré-fabricados, esta decisão foi tomada devido a dificuldades de beneficiamento dos resíduos de estacas e lajes alveolares, em virtude de limitações dimensionais do britador, associada à necessidade de remoção da armadura de aço existente no interior dos resíduos para a cominuição do material e ao atendimento do cronograma previamente estipulado.

Assim sendo, os resíduos de concreto foram moldados na indústria de pré-fabricados em fôrmas de tamanho 10x20cm, com adensamento em mesa vibratória, sendo submetidos ao mesmo tipo de cura utilizada no processo produtivo da empresa. Após o período de cura na indústria, cura convencional ao ar ou térmica a vapor d'água, tais resíduos foram mantidos a temperatura ambiente até os 28 dias, sendo cominuídos em britador de mandíbulas e peneirados em agitador mecânico para separação da fração graúda (fração de interesse). Definiu-se anteriormente que a fração de interesse do agregado reciclado seria a retida entre as peneiras #4,75mm e #19,0mm, devido à composição granulométrica do agregado graúdo natural utilizado, o qual somente possuía material retido neste intervalo, garantindo, portanto, a mesma dimensão máxima característica. Como última etapa da preparação do material armazenou-se o mesmo em estufa a temperatura de 105±5°C, por período de 7 dias,

² Devido a problemas com o equipamento de análise e aos prazos de conclusão do trabalho não foi possível apresentar a caracterização desta cinza.

garantindo a secagem completa do mesmo e portanto, a parada por completo do processo de hidratação do cimento. O agregado reciclado de concreto pode ser visualizado na Figura 10.



Figura 10 – Aspecto geral do resíduo de concreto após beneficiamento.

Os resíduos de concreto utilizados na pesquisa são originários de 2 diferentes tipos de concretos gerados pela indústria: resíduo de concreto seco, cura convencional ao ar, RCC, e cura térmica à vapor de água, RCT, (selecionados de acordo com o item 3.3), todos confeccionados com insumos da própria indústria.

Para a caracterização dos resíduos de concreto também foi realizada a confecção dos corpos de prova, sendo os ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, conforme apresentado na sequência:

3.4.6.1 Resistência à compressão axial

Após períodos de cura submersa de 1, 7, 28 e 63 dias, os resíduos de concreto em formato de corpos-de-prova cilíndricos de tamanho 10x20cm, foram capeados com enxofre, sendo posteriormente realizados os ensaios de resistência à compressão axial. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 16;

Tabela 16 - Resistência média à compressão axial dos agregados reciclados de concretos (ARC)².

Período de Cura Submersa (dias)	Resistência à Compressão dos ARC (MPa) ¹	
	RCT	RCC
1	29,5	7,5
7	42,5	33,6
28	45,7	40,0
63	46,9	40,4

¹ ABNT NBR 5739:2003.

² Traço unitário em massa não fornecido pela indústria.

3.4.6.2 Absorção de água por imersão

O ensaio foi realizado após períodos de cura submersa de 7, 28 e 63 dias dos resíduos de concreto em formato de corpos-de-prova, sendo os mesmos retirados e levados a um processo de cominuição em britador de mandíbulas, com posterior peneiramento em agitador mecânico por intervalo de tempo de 10 minutos. Nesta etapa a fração graúda deste material foi segregada, ou seja, ocorreu separação do material passante pela peneira de abertura # 19,0 mm e retido na peneira de abertura # 4,75 mm. Tal material permaneceu em estufa, a temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até a garantia de que o mesmo encontrava-se completamente seco, com massa constante (variação de $\pm 0,1\text{g}$).

Para realização do ensaio de absorção de água por imersão dos agregados reciclados de concreto (ARC) ao longo do tempo, utilizou-se o método adotado por Werle (2010) e Troian (2010).

As etapas do ensaio de absorção de água por imersão do agregado graúdo reciclado de concreto, oriundo da indústria de pré-fabricados, serão descritas a seguir:

Etapa 1 - Registro de absorção nos primeiros 3 minutos:

- A amostra seca, previamente pesada e resfriada em dessecador, é colocada dentro de um recipiente vazado submerso em água, ao alcançar o primeiro minuto este material foi retirado da água, seco superficialmente com um pano úmido, e sua massa foi determinada. Esta sequência foi realizada com 3 amostras de 500g;
- Utilizaram-se mais duas amostras de 500g para realização do ensaio, secas da mesma forma descrita anteriormente, e resfriadas em dessecador, sendo uma ensaiada para o segundo minuto e outra para o terceiro, sempre dispondo as amostras dentro de recipiente vazado e submergindo-as em água. Após alcançar os 2 minutos o material foi retirado da água, seco

superficialmente com um pano úmido, e a massa foi determinada em balança, sendo o mesmo procedimento utilizado para a determinação do acréscimo de massa até os 3 minutos;

.Etapa 2 – Registro da absorção de água ao longo do tempo:

- Após a conclusão da etapa 1, uma sexta amostra foi seca em estufa, a temperatura de $105^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, até a garantia de que a mesma se encontrava completamente seca, após resfriada em dessecador até estabilização da temperatura, colocada em um recipiente vazado, apoiada em uma balança hidrostática, e submersa em água;
 - Após 2 minutos, houve registro da massa determinada na balança hidrostática, sendo que esta medição foi repetida nos seguintes intervalos de tempo: 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos; 2, 4, e 6 horas, 1, 2, 7, 14, 21, 28 dias, até determinação de constância de massa
- Figura 11.



Figura 11 - Visualização da análise de absorção de água dos agregados reciclados de concreto em balança hidrostática.

Para o traçado da curva de acréscimo de massa, considera-se o acréscimo de massa do primeiro minuto obtido na etapa 1 e os restantes obtidos na etapa 2. Os acréscimos de massa obtidos entre o primeiro e segundo minutos, e entre o segundo e terceiro minutos, na etapa 1, servem para validação dos acréscimos de massa encontrados na etapa 2.

A absorção de água dos agregados reciclados de concreto (ARC) RCT e RCC, para os períodos de cura submersa de 7, 28 e 63 dias e do agregado natural (AGN) são apresentados na Tabela 17, e os gráficos da porcentagem (%) de absorção de água com relação ao peso

inicial da amostra ao longo do tempo, expresso em raiz t (min), são apresentados nas Figuras 12 e 13.

Tabela 17 - % de Absorção de água do ARC-RCT, ARC-RCC e AGN.

Tempo (min)	Raiz t (min)	(%) Absorção de Água ARC-RCT			(%) Absorção de Água ARC-RCC			(%) Absorção de Água AGN
		7 dias	28 dias	63 dias	7 dias	28 dias	63 dias	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,00	3,85	3,67	3,32	3,52	3,52	3,63	0,89
2	1,41	4,10	6,35	4,68	4,37	3,90	6,94	1,76
4	2,00	4,75	7,14	5,10	4,93	4,55	7,58	1,86
5	2,24	4,93	7,47	5,28	5,23	4,81	7,80	1,90
10	3,16	5,53	8,37	5,84	5,98	5,63	8,63	2,18
30	5,48	6,75	9,31	6,89	7,18	7,80	10,18	2,38
60	7,75	7,32	9,53	7,98	8,12	9,25	10,67	2,77
120	10,95	7,77	9,74	8,65	8,53	9,57	11,35	2,87
240	15,49	8,18	9,96	8,75	8,83	9,96	11,65	3,01
360	18,97	8,47	10,72	8,89	9,04	10,07	12,40	3,18
1440	37,95	8,65	10,93	9,39	10,33	10,47	13,53	3,46
2880	53,67	8,71	11,37	9,39	10,88	10,61	14,55	
10080	100,40	8,91	11,73	9,67	12,72	10,82	15,23	
20160	141,99	9,16	11,77	9,88	13,05	11,15	15,46	
30240	173,90	9,35	11,91	9,91	13,36	11,41	15,76	
40320	200,80	9,40	12,20	9,95	13,58	11,86	16,32	

Onde: RCT=Resíduo de cura térmica; RCC=Resíduo de cura convencional, AGN=Agregado graúdo natural.

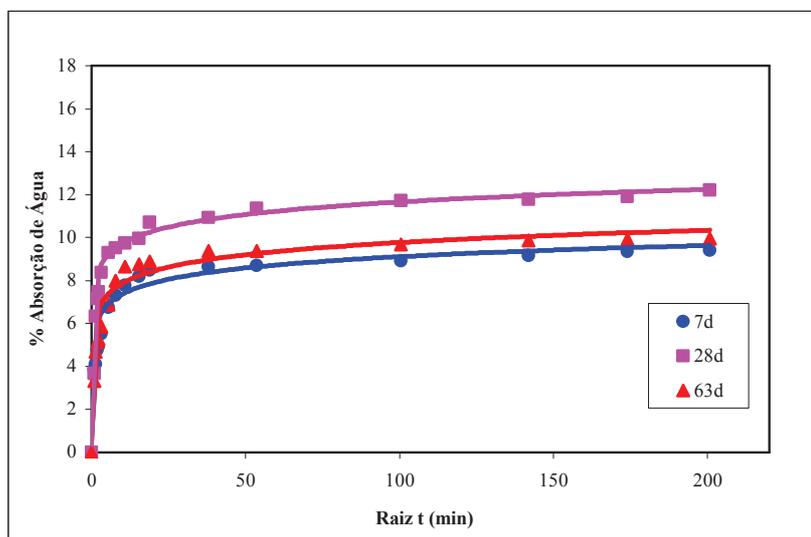


Figura 12 - Curva de absorção de água do RCT para os 7, 28 e 63 dias de cura submersa.

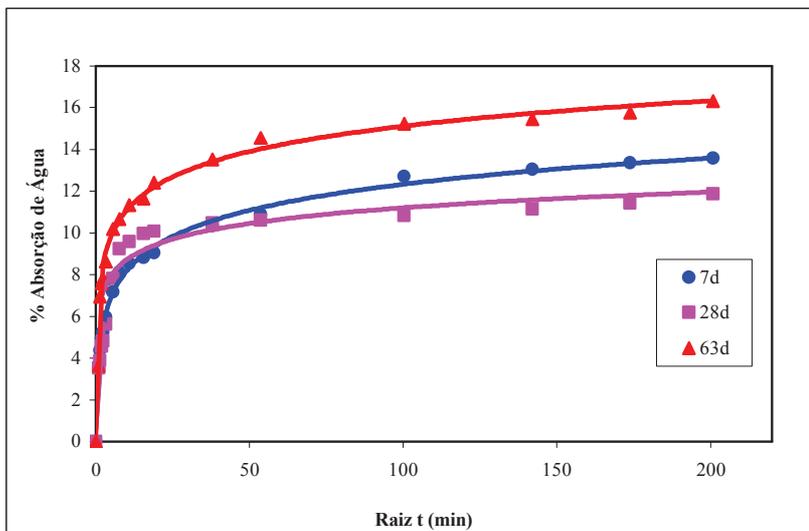


Figura 13 - Curva de absorção de água do RCC para os 7, 28 e 63 dias de cura submersa.

A Figura 14 apresenta o gráfico de absorção de água dos agregados graúdos reciclados de concreto RCT e RCC, aos 28 dias de cura submersa, mesma idade do material utilizado na confecção dos corpos de prova ensaiados, em comparação ao agregado graúdo natural.

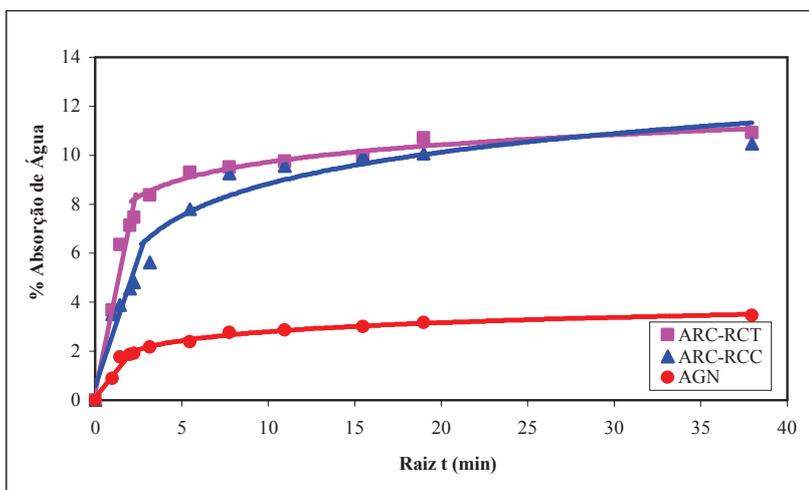


Figura 14 - Absorção de água do RCT e RCC, com 28 dias de cura e AGN.

Os resultados de absorção de água dos ARC são fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa, pois conforme visualizado na Figura 14, o percentual de água absorvido pelo agregado reciclado de concreto (ARC) é muito superior ao do agregado graúdo natural (AGN).

Os agregados reciclados de concreto possuem grande porosidade devido à argamassa que permanece aderida aos mesmos após o processo de cominuição em britador, esta característica influencia diretamente a propriedade de absorção de água dos mesmos, a qual deve ser compensada quando da utilização do material em novos traços de concreto.

Com base nos resultados apresentados e na verificação de que a maior absorção de água acontece nos primeiros 10min de ensaio, havendo um aumento pouco significativo nos minutos seguintes, optou-se pela utilização de água de compensação para a fabricação dos novos traços de concreto com agregado graúdo reciclado de concreto, sendo a quantidade de água de compensação calculada em função da absorção de água que ocorre neste tempo.

Determinação da água de compensação - Através do ensaio de absorção de água ao longo do tempo foi determinada a quantidade de água de compensação a ser utilizada na substituição do agregado graúdo natural pelo RCT e RCC. O cálculo dos percentuais de água absorvidos pelas amostras foi realizado com relação à massa inicial de amostra submersa em água, conforme Equação 6.

$$(\%) \text{ Abs. H}_2\text{O} = \left(\frac{m_f - m_i}{m_i} \right) \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

(%) Abs. H₂O = Percentual de água absorvido pelo agregado reciclado de concreto,
 m_f = Massa de amostra final (g) de agregado reciclado de concreto,
 m_i = Massa de amostra inicial (g) de agregado reciclado de concreto.

A substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado de concreto, deu-se na porcentagem de 50% em volume, Equação 7, sendo o cálculo da água de compensação baseada na massa de agregado graúdo natural utilizada em cada mistura, Equação 8.

$$\text{MARC} = \left(\frac{\text{MAGN}}{\mu_{\text{ARC}}} \right) \times \mu_{\text{AGN}} \quad \text{Equação 7}$$

MARC = Massa de Agregado Reciclado de Concreto a ser utilizada (g),
 MAGN = Massa de Agregado Natural inicialmente utilizada (g),
 μ_{AGN} = Massa Específica do Agregado Natural (g/cm³),
 μ_{ARC} = Massa Específica do Agregado Reciclado (g/cm³).

$$AC = \text{MARC} \times \left(\frac{(\%) \text{ Abs. H}_2\text{O}}{100} \right)$$

Equação 8

Onde:

AC = Água de Compensação,

3.4.6.3 Massa específica

Durante a realização do ensaio de absorção de água dos ARCs para as idades de 7, 28 e 63 dias de cura submersa em solução de água e cal hidratada, foi calculada a massa específica no tempo de 24 horas, ABNT NBR NM 53:2002, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Massa Específica (g/cm³) dos ARCs.

Tempo de Cura Submersa (dias)	Massa Específica (g/cm ³) dos ARCs ¹	
	ARC-RCT	ARC-RCC
7	2,38	2,30
28	2,37	2,33
63	2,44	2,28

Onde: RCT=Resíduo de cura térmica; RCC=Resíduo de cura convencional.

¹ ABNT NBR NM 53:2002.

3.4.6.4 Massa unitária

Realizada de acordo com ABNT NBR NM 45:2006, sendo definida como a massa da unidade de volume a granel, nas condições de compactação e umidade em que o ensaio é realizado. Este ensaio foi executado somente após a decisão da idade de utilização dos agregados graúdos reciclados de concreto, portanto, para a idade de 28 dias de cura submersa, conforme apresentado na Tabela 19;

Tabela 19 - Massa Unitária dos Resíduos de Concreto.

Tempo de Cura Submersa (dias)	Massa Unitária (g/cm ³) do ARC ¹	
	ARC-RCT	ARC-RCC
28	1,16	1,07

Onde: RCT=Resíduo de cura térmica; RCC=Resíduo de cura convencional.

¹ ABNT NBR NM 45:2006.

3.4.6.5 Determinação da composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica foi realizado para as amostras curadas submersamente em água e solução de cal por período de 7, 28 e 63 dias, sendo realizada

conforme a ABNT NBR NM 248:2003, em agitador mecânico, sendo o ensaio executado com duas amostras por idade de cura, conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Composição Granulométrica¹ do ARCs para diversas idades de cura submersa.

Peneira (mm)	% Média Acumulada de Massa Retida ¹					
	ARC-RCT			ARC-RCC		
	7dias	28 dias	63 dias	7dias	28 dias	63 dias
< 4,75mm	3,68	7,69	9,94	16,83	17,12	21,44
4,75	8,37	12,59	13,74	22,40	22,48	25,90
6,30	19,55	23,67	23,29	35,75	35,08	39,29
9,50	28,84	33,81	33,12	44,55	43,33	48,57
12,50	75,34	79,89	81,43	78,52	82,75	85,89
19,00	97,13	99,41	97,94	96,68	97,71	96,58
25,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Onde: RCT=Resíduo de cura térmica; RCC=Resíduo de cura convencional.

¹ ABNT NBR NM 248:2003

A seguir nas Figuras 15 e 16 são apresentados os gráficos da composição granulométrica das amostras de RCT e RCC curadas submersamente pelos períodos de 7, 28 e 63 dias. Na Figura 17 é apresentado o gráfico comparativo entre o agregado gráudo natural (AGN) e as amostras de agregado reciclado de concreto RCT e RCC, submetidas a cura submersa por período de 28 dias, idade na qual estes resíduos foram utilizados para a confecção das novas matrizes de concreto. Os gráficos são expressos em porcentagem retida acumulada de acordo com a série de peneiras (mm).

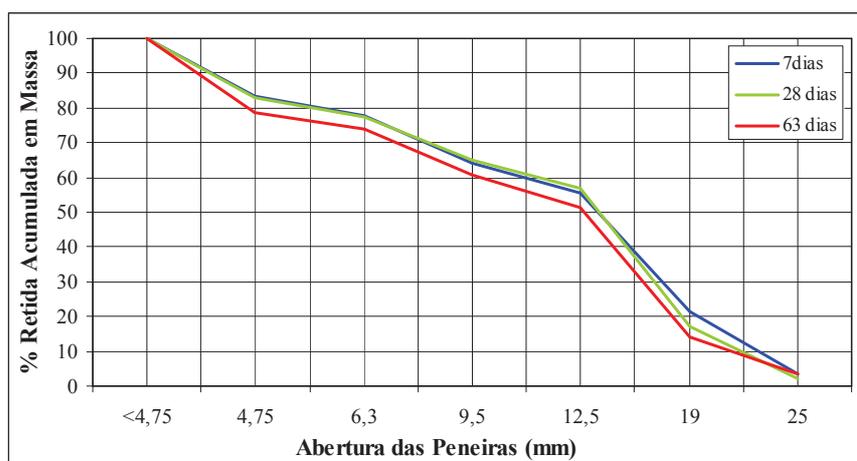


Figura 15 - Curva da Distribuição Granulométrica do RCT para os 7, 28 e 63 dias de cura submersa.

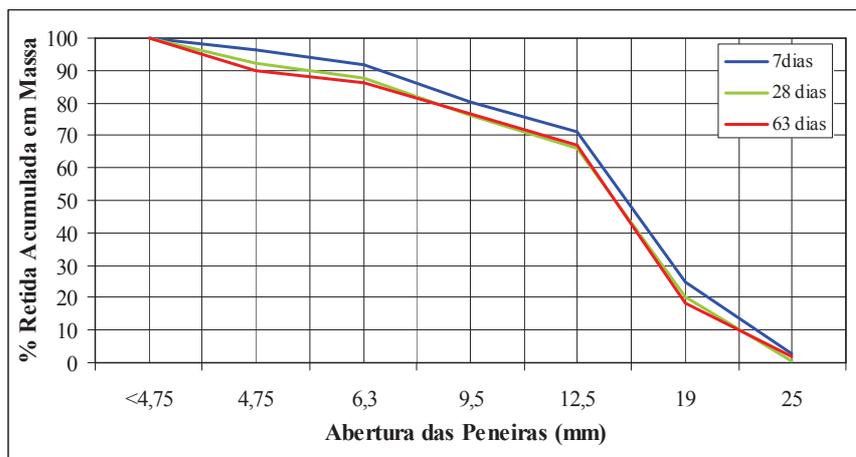


Figura 16 - Curva da Distribuição Granulométrica do RCC para os 7, 28 e 63 dias de cura submersa.

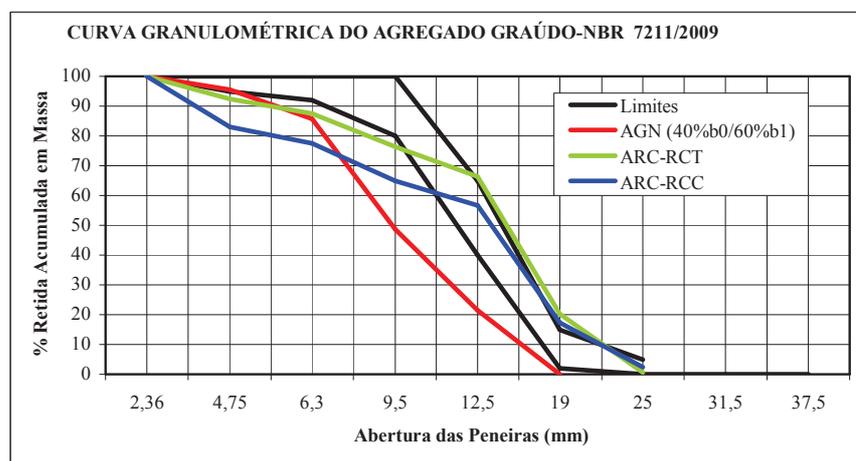


Figura 17 - Curva da Distribuição Granulométrica comparativa entre o RCT, RCC, para a idade de 28 dias de cura submersa, e a composição do AGN (40% b0 e 60% b1).

3.4.6.6 Forma do grão

Realizado conforme a ABNT NBR 7809:2006 e ABNT NBR 7221:2009, sendo executada a medição dos grãos nas três dimensões, largura, altura e comprimento. A determinação do número de grãos medidos foi realizada com paquímetro digital de acordo com o peso de amostra retida em cada peneira, variando da peneira #19,0mm à #4,75mm. O índice de forma do grão foi determinado pela relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado reciclado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica, sendo este índice inferior a 3.

3.4.6.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizado no CETEMP (Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão) do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), executado no equipamento Marca Shimadzu SSX-550, tendo como objetivo principal a visualização aproximada do RCT e RCC, com idade de 28 dias.

As amostras dos resíduos foram preparadas através da eliminação da umidade, sendo cortadas em serra, mergulhadas em álcool isopropílico até a eliminação completa das bolhas de ar internas, com duração em torno de 1 hora e colocação em estufa na temperatura de 60°C até a data do ensaio. Estas amostras foram retiradas da estufa e resfriadas em dessecador com a presença de sílica. O ensaio foi realizado em baixo vácuo com detectores de elétrons retroespalhados (SBE) e em alto vácuo com os detectores de elétrons (SE) secundários e de elétrons retroespalhados após metalização, devido às amostras não serem condutoras.

As Figuras 18 a 23 relacionadas a seguir, apresentam a descrição do visualizado na microscopia eletrônica de varredura, bem como o aumento realizado pelo equipamento para observação das amostras.

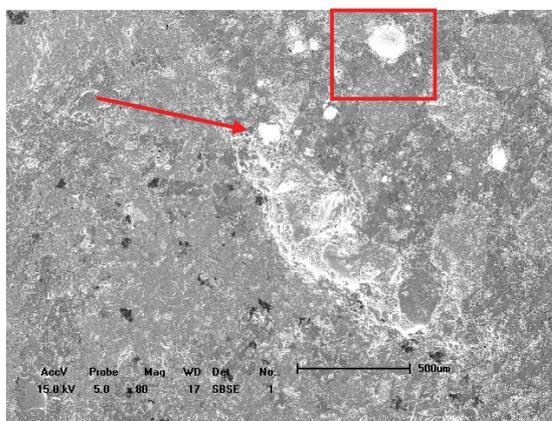


Figura 18 – RCC, aumento de 80 vezes, detector BSE.

Na Figura 18, com aumento de 80 vezes, podem ser observadas manchas escuras, que possivelmente sejam poros existentes no RCC. As manchas escuras maiores e arredondadas, visualizadas na amostra são provavelmente espaços vazios oriundos da presença de ar aprisionado na amostra.

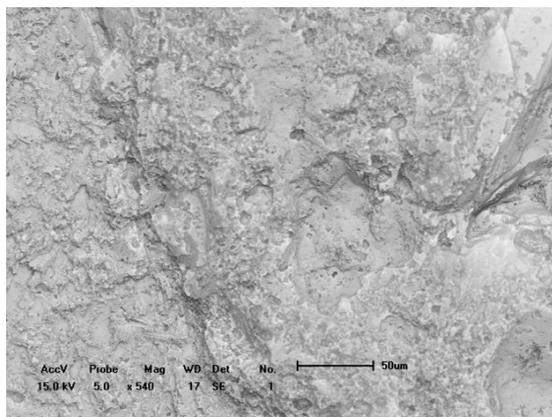


Figura 19 – RCC, aumento de 540 vezes, detector SE.

Na Figura 19, com aumento de 540 vezes, pode ser observada a porosidade em geral existente na amostra de RCC.

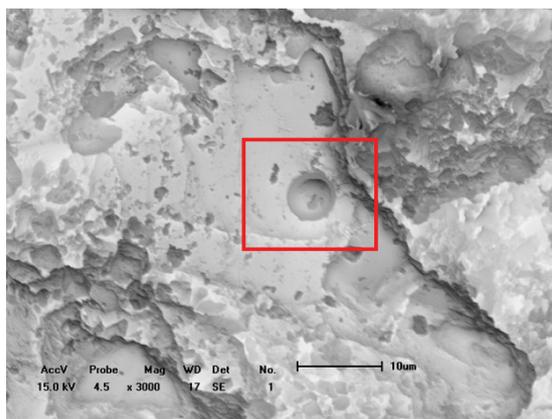


Figura 20 – RCC, aumento de 3.000 vezes, detector SE.

Na Figura 20, com aumento de 3.000 vezes, pode ser observada a provável presença de cinza volante existente no RCC em formato arredondado no centro da figura, bem como a observação da parte interna dos poros da amostra.

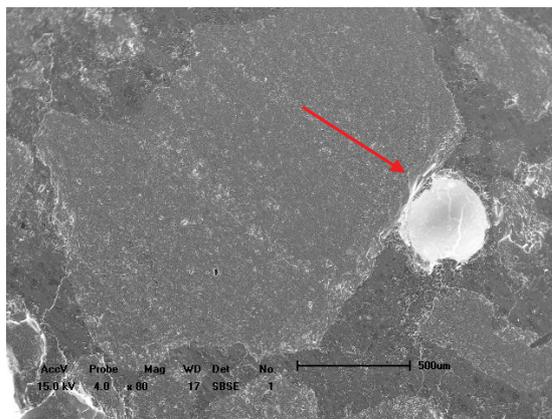


Figura 21 - RCT, aumento de 80 vezes, detector BSE

Na Figura 21, com aumento de 80 vezes, pode ser observada uma mancha escura arredondada que possivelmente seja um vazio oriundo da possível presença de ar aprisionado existente na amostra de RCT.

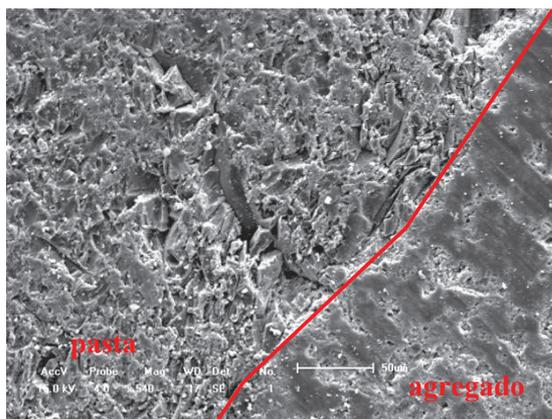


Figura 22 - RCT, aumento de 540 vezes, detector SE.

Na Figura 22, com aumento de 540 vezes, pode ser observada a possível zona de transição existente entre o agregado e a pasta do concreto, podendo também ser visualizada na pasta a porosidade geral da amostra de RCT.

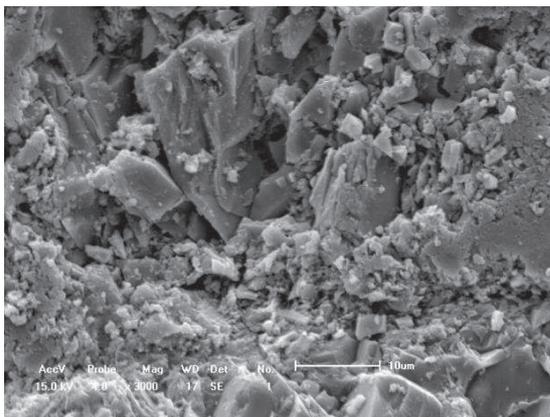


Figura 23 - RCT, aumento de 3.000 vezes, detector SE.

Na Figura 23, com aumento de 3.000 vezes, pode ser observada a parte interna dos poros existentes na amostra de RCT.

Uma questão que merece ser destacada é a característica de quantidade de poros das amostras, podendo ser visualizada nas Figuras 19 e 22, sendo que aparentemente o número de poros da amostra RCT é superior ao da amostra RCC. Para que esta suposição seja confirmada é necessária à realização de porosimetria nestas amostras.

3.5 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E DOS CORPOS DE PROVA

Para a dosagem dos concretos definiu-se um teor ótimo de argamassa (α) de 55%, baseado no teor empregado pela indústria de pré-fabricados, e a substituição de 50% em volume de agregado gráúdo natural pelo reciclado de concreto RCC e RCT, sendo o teor de substituição utilizado baseado em estudos anteriores desenvolvidos nesta instituição pelas autoras Werle (2010) e Troian (2010).

A nomenclatura dos corpos de prova confeccionados no programa experimental, de acordo com o tipo de resíduo de concreto, traço dos novos concretos e teor de substituição de agregado gráúdo natural por reciclado de concreto são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Nomenclatura dos traços de concretos do programa experimental.

Traço do Concreto Novo	Resíduo	Teor de substituição	Composição
Pobre	sem	sem	TP
	RCC	50%	TP-RCC
	RCT	50%	TP-RCT
Intermediário	sem	sem	TI
	RCC	50%	TI-RCC
	RCT	50%	TI-RCT
Rico	sem	sem	TR
	RCC	50%	TR-RCC
	RCT	50%	TR-RCT

Onde: RCT=Resíduo de cura térmica; RCC=Resíduo de cura convencional.

Para a confecção dos novos traços foram realizadas duas misturas em dias ou períodos do dia diferenciados, o que levou a uma demanda de aditivo diferente para cada mistura, a fim de que se mantivesse o “slump”, sendo confeccionadas 44Kg de massa a cada mistura. As quantidades de materiais e traços empregados nas misturas são apresentadas na Tabela 22.

SIGLA	Traço (c:a:b)	a/c	Teor de ARC (%)	Quantidades (Kg)							Aditivo (g)	Slump (mm)	
				Cimento	Cinza Volante	Arcia	Brita Natural	ARC	Água Compensação	Água		Inicial	Ajustado
TP	1:2,78:3,10	0,58	0	6,461	0,969	17,987	20,000	0	4,478	0	29,7	115	180
TP	1:2,78:3,10	0,58	0	6,461	0,969	17,987	20,000	0	4,478	0	29,7	110	205
TP-RCC	1:2,78:3,10	0,61	50	6,461	0,969	17,987	10,000	9,710	4,478	0,273	27,2	80	200
TP-RCC	1:2,78:3,10	0,61	50	6,461	0,969	17,987	10,000	9,710	4,478	0,273	26,0	120	200
TP-RCT	1:2,78:3,10	0,62	50	6,461	0,969	17,987	10,000	9,880	4,478	0,413	17,2	120	215
TP-RCT	1:2,78:3,10	0,62	50	6,461	0,969	17,987	10,000	9,880	4,478	0,413	5,9	160	210
TI	1:2,23:2,65	0,50	0	7,560	1,134	16,888	20,000	0	4,239	0	34,8	120	175
TI	1:2,23:2,65	0,50	0	7,560	1,134	16,888	20,000	0	4,239	0	34,8	100	170
TI-RCC	1:2,23:2,65	0,52	50	7,560	1,134	16,888	10,000	9,710	4,239	0,273	33,0	35	170
TI-RCC	1:2,23:2,65	0,52	50	7,560	1,134	16,888	10,000	9,710	4,239	0,273	13,6	25	170
TI-RCT	1:2,23:2,65	0,53	50	7,560	1,134	16,888	10,000	9,880	4,239	0,413	19,1	100	200
TI-RCT	1:2,23:2,65	0,53	50	7,560	1,134	16,888	10,000	9,880	4,239	0,413	11,8	140	185
TR	1:1,68:2,20	0,42	0	9,109	1,366	15,339	20,000	0	4,429	0	32,4	80	190
TR	1:1,68:2,20	0,42	0	9,109	1,366	15,339	20,000	0	4,429	0	30,3	85	175
TR-RCC	1:1,68:2,20	0,44	50	9,109	1,366	15,339	10,000	9,710	4,429	0,273	53,0	30	175
TR-RCC	1:1,68:2,20	0,44	50	9,109	1,366	15,339	10,000	9,710	4,429	0,273	50,5	45	185
TR-RCT	1:1,68:2,20	0,45	50	9,109	1,366	15,339	10,000	9,880	4,429	0,413	48,4	55	170
TR-RCT	1:1,68:2,20	0,45	50	9,109	1,366	15,339	10,000	9,880	4,429	0,413	50,2	40	180

Tabela 22 – Quantidades de materiais e traços empregados nas misturas.

Onde: a/c=relação água aglomerante (cimento+cinza volante), slump=abatimento de tronco de cone.

O abatimento foi fixado para o traço intermediário, sem incorporação do agregado reciclado de concreto (ARC), concreto referência, para a faixa de $100\pm 20\text{mm}$, garantindo as propriedades do concreto no estado fresco, realizando o ajuste necessário com água. A medição de abatimento foi realizada com tronco de cone e adensamento de 25 golpes em três camadas. Após o controle do primeiro abatimento, houve colocação do aditivo superplastificante na betoneira, misturando o concreto por período de 2 minutos corrigindo o abatimento para a faixa de $200\pm 30\text{mm}$, sendo realizado novo “slump”. O ajuste para esta faixa de valor foi realizado devido ao fato de ser a mesma empregada pela empresa, para os concretos fluidos utilizados na produção de painéis de vedação, peças nas quais a indústria de pré-fabricados tem objetivo de empregar o material reciclado.

Na seqüência foram determinados outros dois traços de concreto, um mais pobre em consumo de cimento e com relação água aglomerante mais elevada, ao ser comparado ao intermediário, inicialmente confeccionado, e outro mais rico em consumo de cimento e com menor relação água aglomerante, sendo realizado o mesmo procedimento de ajuste da quantidade de água, fixando o abatimento inicial e ajustando o novo abatimento com a colocação de aditivo.

A confecção dos corpos de prova foi realizada em betoneira de eixo vertical, sendo primeiramente colocado o agregado graúdo, $1/3$ da água utilizada no procedimento, posteriormente o cimento, a cinza volante, mais $1/3$ da água necessária, finalizando com a areia e o restante da água. Este procedimento transcorreu por período de 10 minutos, sendo realizada a medição do primeiro “slump” aos 18 minutos e colocado o aditivo para ajuste do abatimento. Posteriormente a massa foi misturada por mais 2 minutos e o novo “slump” medido. Nos traços confeccionados com ARC foi estabelecido que este material seria colocado juntamente ao agregado graúdo natural na betoneira, sendo a seguir misturada $1/3$ da água inicial do processo e juntamente adicionada à água de compensação referente à taxa de absorção de água deste agregado. A taxa de compensação de água utilizada foi referente aos 10 minutos de absorção dos ARCs. O procedimento da confecção dos concretos transcorreu igualmente como na confecção dos traços referência, por período de tempo de 10 minutos, portanto, suficiente para que o material absorvesse a água de compensação do início do processo.

Os corpos de prova para os ensaios foram moldados em fôrmas cilíndricas ($10\text{cm}\times 20\text{cm}$), conforme recomendação da ABNT NBR 5738:2003, sem e com 50% de teor de substituição de agregado graúdo natural pelo reciclado de concreto (ARC). Os CPs foram

confeccionados com adensamento manual, em duas camadas de 12 golpes cada uma e permaneceram nos moldes por período de 24 horas, a temperatura ambiente, protegidos no topo por placas de vidro, para que não perdessem água. Após a desmoldagem os corpos de prova foram enviados à câmara úmida, com temperatura e umidade controladas, para procedimento de cura até as idades de ensaio.

Em virtude dos concretos não serem confeccionados em sala climatizada, o abatimento inicial para os corpos-de-prova com substituição de agregado natural por ARC não pôde ser mantido, conforme Tabela 22, pois ocorreram grandes variações de umidade e temperatura entre a confecção das misturas, sendo sempre realizado ajuste do abatimento com aditivo, para trabalhabilidade na faixa de 200 ± 30 mm.

3.6 MÉTODOS DE ENSAIO

A seguir são apresentados os ensaios mecânicos e de durabilidade realizados na pesquisa.

3.6.1 Ensaio mecânicos

Os métodos empregados para o estudo das propriedades mecânicas dos concretos confeccionados são os apresentados na seqüência, sendo todos os ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, nas três matrizes de concreto sem e com teor de 50% de substituição de agregado graúdo natural por reciclado de concreto.

3.6.1.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados de acordo com a ABNT NBR 5739:2003. O ensaio foi realizado em corpos de prova de dimensões 10x20cm, capeados com enxofre para que a superfície fosse regularizada, e retirados da cura em câmara úmida nas idades de 7, 28 e 63 dias, data da execução da análise. Para cada idade foram ensaiados três corpos de prova de cada novo traço de concreto confeccionado, podendo o ensaio ser visualizado na Figura 24.



Figura 24 - Ensaio de resistência à compressão axial.

3.6.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram executados de acordo com a ABNT NBR 5739:2003. O ensaio foi realizado em corpos de prova de dimensões 10x20cm, retirados da cura em câmara úmida na idade de 28 dias, diretamente para o ensaio, sendo ensaiados três corpos-de-prova de cada traço de concreto confeccionado, podendo o ensaio ser visualizado na Figura 25.



Figura 25 - Ensaio de resistência à compressão por tração diametral.

3.6.2 Ensaio de durabilidade

O método empregado para estudo da durabilidade dos concretos confeccionados é o apresentado na seqüência, sendo o ensaio realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, nas três matrizes de concreto, sem e com o teor de 50% de substituição de agregado graúdo natural por reciclado de concreto.

3.6.2.1 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu o procedimento recomendado pela norma RILEM TC 116-PCD, sendo que de um corpo de prova cilíndrico de dimensões 10x20cm, retirado da cura em câmara úmida aos 28 dias, foi removida uma fatia de 5 cm de altura, sendo desprezado o fundo.

Depois de realizados os cortes, as peças permaneceram em estufa a temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ até completa secagem, ou seja, constância de massa. Logo após a estabilização de massa as peças ficaram em dessecador para resfriamento, tendo posteriormente a lateral selada e a face superior coberta com material plástico. Neste procedimento a face livre foi mantida em contato com a água e a remanescente, conforme ilustrado, coberta com material flexível, porém estanque, podendo assim, ocorrer à saída de ar presente na rede de poros à medida que a mesma foi sendo absorvida pela amostra. Podendo ser visualizado o desenho esquemático do ensaio na Figura 26 e da própria análise na Figura 27.

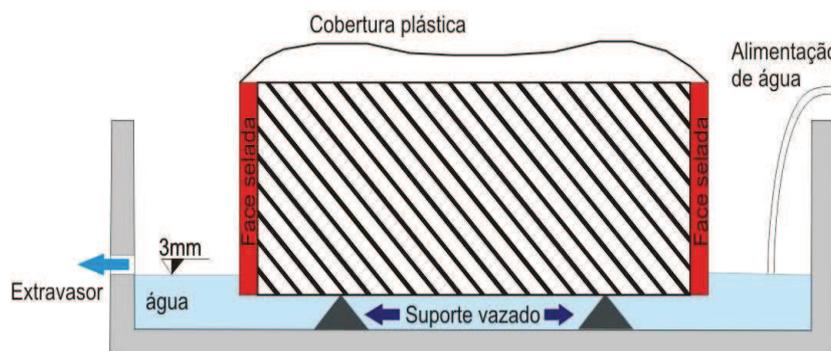


Figura 26 – Desenho esquemático do ensaio de absorção de água por capilaridade.



Figura 27 - Sistema de absorção de água por capilaridade.

No sistema visualizado na Figura 27 a amostra foi mantida parcialmente submersa em água, sendo controlado o ganho de massa pela penetração de água, nos tempos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30 e 60 min, 2, 6, 24, 48, 72 e 96 horas.

A água de absorção foi registrada para cada intervalo de tempo, sendo calculada de acordo com a equação:

$$W(t) = m(t) - m_0$$

Equação 9

Sendo:

W = a diferença de massa do corpo de prova no tempo considerado;

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

m₀ = a massa inicial do corpo de prova seco.

3.6.3 Evolução da temperatura das reações de hidratação

Os ensaios de monitoramento da evolução da temperatura das reações de hidratação da pasta de cimento existente nos concretos confeccionados foram realizados seguindo o procedimento RILEM TC 119 TE e com a ABNT NBR 12819:1993, sendo confeccionados corpos de prova pesando aproximadamente 300g através de sistema adaptado, utilizando-se uma parafusadeira com haste acoplada, conforme Figura 28.

Os corpos de prova foram confeccionados individualmente sendo acomodados em uma câmara isolada termicamente por isopor e madeira, instalada no interior de sala climatizada, temperatura e umidade constante, sendo em cada amostra introduzido um termopar do tipo K para verificação da variação da temperatura. O termopar do tipo K obedeceu a seguinte ordem: fio amarelo ligado ao canal positivo (+), fio vermelho ligado ao

canal negativo (-). Na outra extremidade os fios foram ligados formando uma única linha. Esta linha é o sensor que foi colocado no meio cuja temperatura foi monitorada.



Figura 28 – Preparação de amostras para o ensaio de monitoramento da temperatura das reações de hidratação.

Os recipientes que receberam os corpos de prova, cuja temperatura foi monitorada, conforme descrito anteriormente, constitui-se de um sistema de calorímetro semi-adiabático, devidamente isolado para evitar a perda de calor para o meio externo, visualizado na Figura 29. O programa que realiza a leitura da evolução da temperatura de hidratação do concreto é o Picolog Recorder Monitoramento de Temperatura.



Figura 29 – Amostras dispostas no compartimento isolado, acopladas a termopares.

Os corpos de prova foram confeccionados sem e com colocação do aditivo superplastificante, com objetivo de verificação de sua influência na evolução da temperatura das reações de hidratação dos concretos, sendo, portanto, confeccionadas 18 amostras, seis referências, seis com RCC e seis com RCT.

A verificação do início e fim da evolução da temperatura das reações de hidratação dos concretos confeccionados foi realizada conforme Figura 30 a seguir:

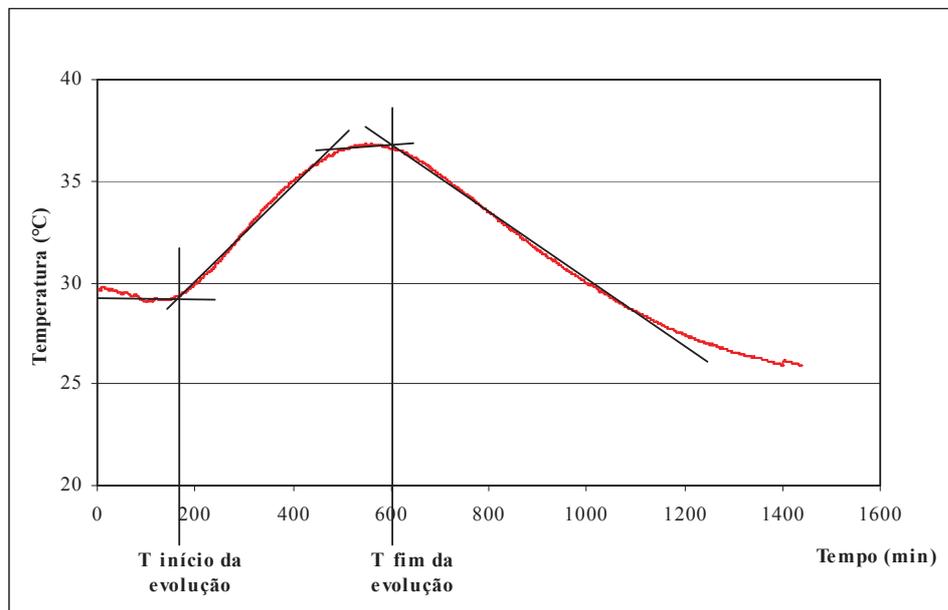


Figura 30 – Início e fim da evolução da temperatura de hidratação.

3.6.4 Análise estatística

O tratamento estatístico dos resultados obtidos nos ensaios foi realizado aplicando-se a ferramenta de regressão múltipla não linear para as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade, com o objetivo de correlacionar os resultados ensaiados por meio de modelagem matemática, resultando em curvas de comportamento, sendo apresentada análise de variância (ANOVA) dos modelos.

Para a propriedade de resistência à compressão axial foi realizado ajuste da curva de Abrams pelo método dos mínimos quadrados e análise de variância (ANOVA).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios executados, em atendimento aos objetivos traçados na pesquisa, para cada variável de resposta, bem como as análises estatísticas empregadas para cada tratamento dos dados.

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os resultados dos ensaios mecânicos das propriedades de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral são apresentados a seguir. Estes ensaios foram realizados com três corpos de prova, sendo executada uma média dos valores encontrados.

4.1.1 Resistência à compressão axial

Os resultados médios obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial (MPa) para as idades de cura de 7, 28 e 63 dias são apresentados na Tabela 23. Os valores individuais são apresentados nos apêndices.

Tabela 23 - Médias de resistência à compressão axial

Traço do Concreto	Tipo de ARC	Resistência (MPa)		
		7 dias	28 dias	63 dias
Traço Pobre (a/c 0,6)	AGN	17,9	26,6	31,1
	RCC	24,7	28,8	32,3
	RCT	20,1	23,9	25,6
Traço Intermediário (a/c 0,49)	AGN	21,0	29,1	37,4
	RCC	31,4	35,1	43,7
	RCT	21,5	30,4	28,2
Traço Rico (a/c 0,42)	AGN	28,1	45,6	44,3
	RCC	31,8	44,9	48,7
	RCT	25,9	31,2	38,3

Onde: a/c=relação água aglomerante (cimento+cinza volante); AGN= agregado graúdo natural; RCC=resíduo de cura convencional; RCT = resíduo de cura térmica.

Com os valores médios da resistência à compressão dos concretos estudados foram ajustadas equações matemáticas para a curva de Abrams para cada uma das idades, 7, 28 e 63 dias, bem como para a curva da Lei de Molinary e reta de dosagem, compondo um diagrama, conforme apresentado nas Figuras 31 a 33. A modelagem das curvas de Abrams foi realizada com base nos valores médios informados, contemplando assim toda a variabilidade de resultados devido às variáveis não controladas e a heterogeneidade do ARC. As equações

matemáticas encontradas foram estabelecidas removendo-se os valores expúrios para cálculo das médias em algumas poucas situações, sendo apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Equações de ajuste da curva de Abrams.

Idade (dias)	Agregado	Equação	r ²
7	Natural	$\text{LOG}(f_c)=1,906-1,088*a/c$	0,8807
7	RCC	$\text{LOG}(f_c)=1,793-0,645*a/c$	0,7544
7	RCT	$\text{LOG}(f_c)=1,554-0,418*a/c$	0,8181
28	Natural	$\text{LOG}(f_c)=2,205-1,300*a/c$	0,9088
28	RCC	$\text{LOG}(f_c)=2,338-1,605*a/c$	0,9635
28	RCT	$\text{LOG}(f_c)=1,880-0,836*a/c$	0,9201
63	Natural	$\text{LOG}(f_c)=2,109-1,027*a/c$	0,9045
63	RCC	$\text{LOG}(f_c)=2,104-0,991*a/c$	0,8574
63	RCT	$\text{LOG}(f_c)=1,991-0,972*a/c$	0,7970

Onde: f_c =Resistência à compressão axial; a/c =relação água aglomerante (cimento+cinza volante); RCC=Resíduo de cura convencional, RCT=Resíduo de cura térmica.

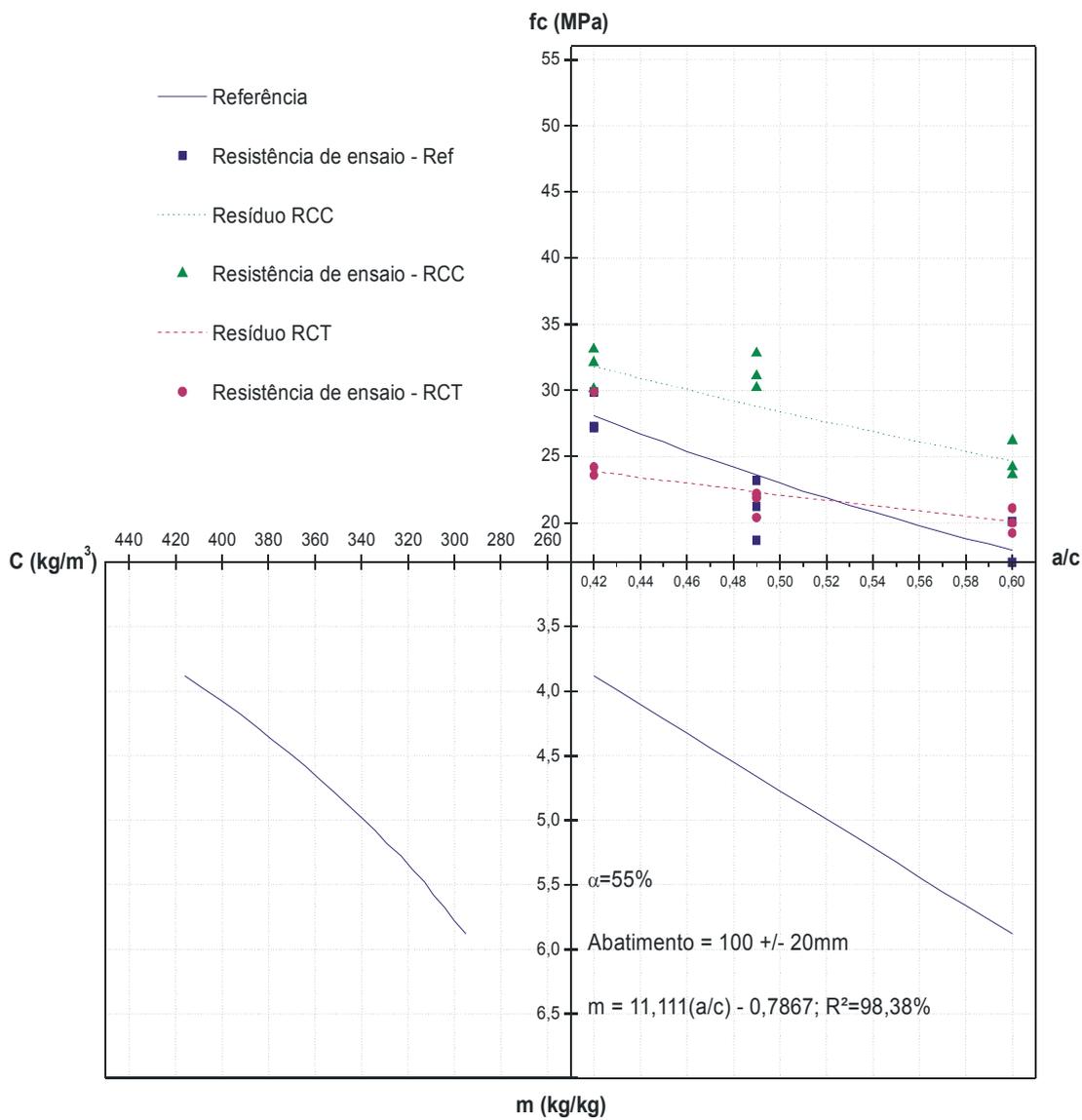


Figura 31 – Diagrama de Abrams, curva da Lei de Molinary e reta de Lyse, para as três novas matrizes de concreto com 7 dias de idade.

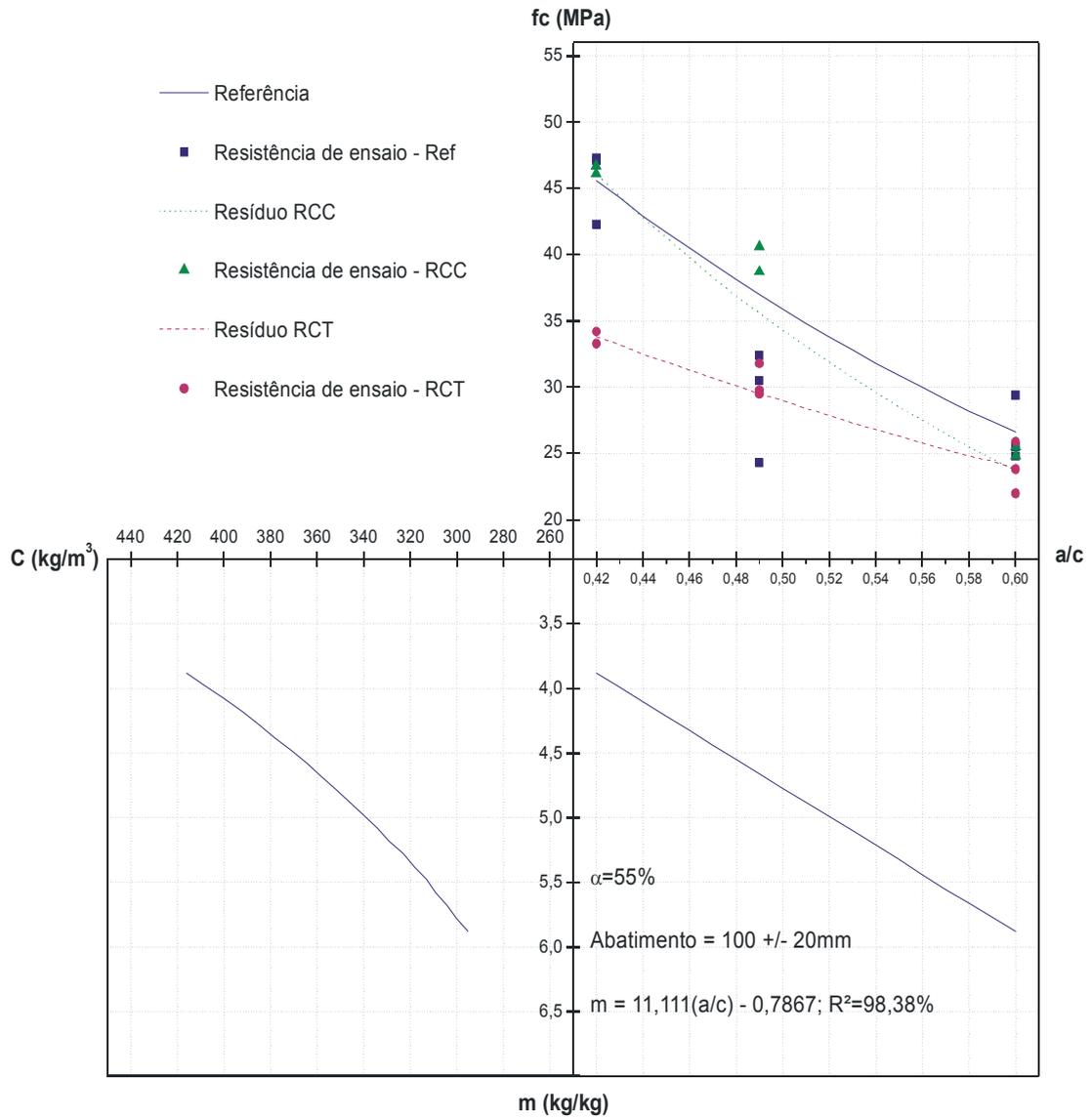


Figura 32 - Diagrama de Abrams, curva da Lei de Monary e reta de Lyse, para as três novas matrizes de concreto com idade de 28 dias.

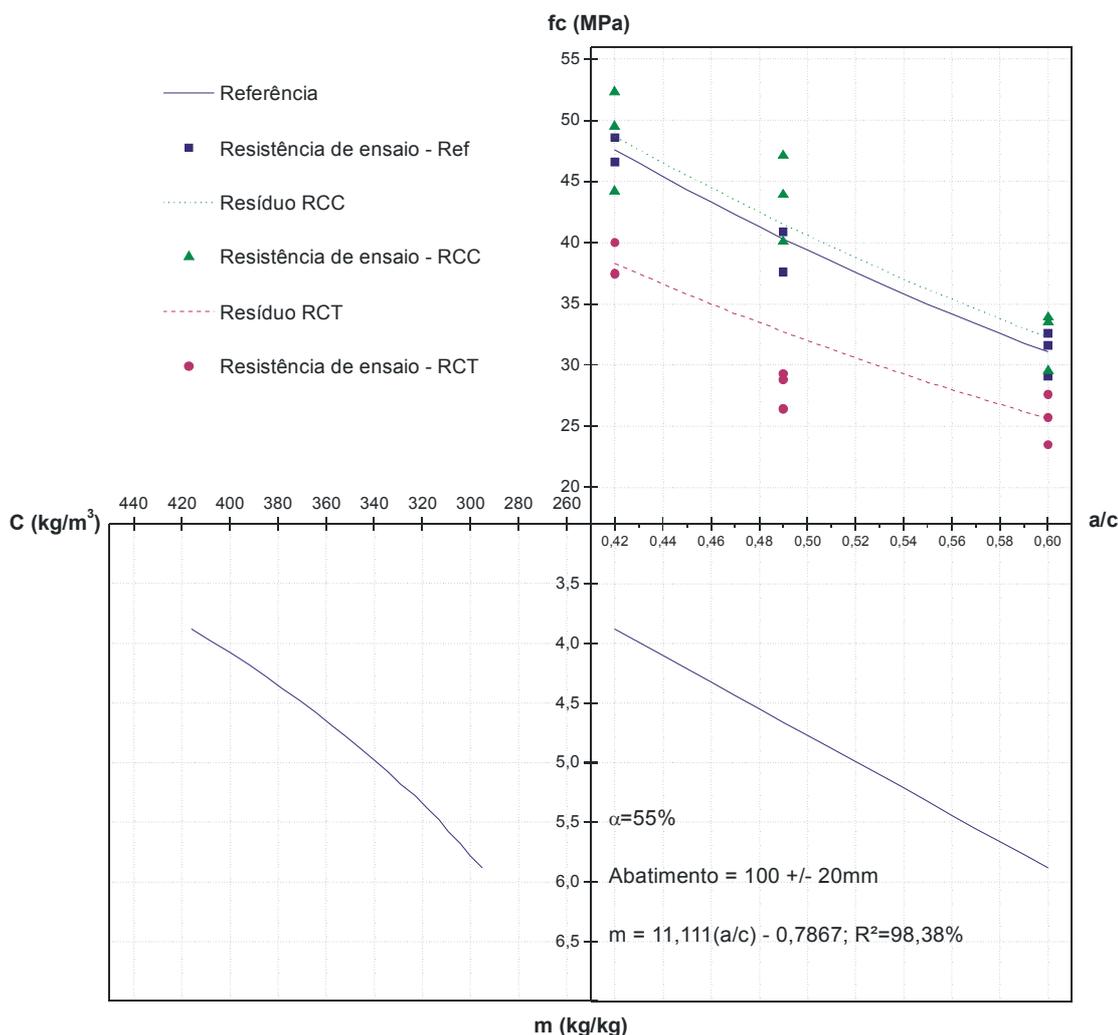


Figura 33 - Diagrama de Abrams, curva da Lei de Monary e reta de Lyse, para as três novas matrizes de concreto com idade de 63 dias.

Ao compararem-se os valores médios encontrados para a resistência à compressão axial das amostras confeccionadas com RCC ao concreto referência, pode-se observar que, em média, obteve-se um aumento de 27% para os 7 dias, de 4% para os 28 dias e 9,5% para os 63 dias.

Algumas justificativas para o comportamento observado pelo concreto confeccionado com RCC foram enumeradas por Butler (2007), que em sua pesquisa obteve resultados semelhantes, verificando que: a) pode existir grande quantidade de partículas de cimento não-hidratadas aderidas à superfície do agregado, as quais devem estar hidratando-se na nova mistura com agregados reciclados; b) apesar das maiores relações água/cimento para os concretos reciclados, pode estar ocorrendo à migração da água do agregado para a pasta logo

após seu endurecimento; nestas condições, a água presente no interior do agregado promoverá uma “cura interna” na zona de transição melhorando suas propriedades.

Já para os concretos confeccionados com RCT, ao comparar-se aos concretos referência, observou-se uma diminuição média de 3% para a idade de 7 dias e 15% tanto para os 28 como para os 63 dias. Explicação para a influência da cura térmica na microestrutura do concreto foi proposta por Silva (2004), observando que uma hidratação inicial mais rápida aparentemente promove a formação de produtos de hidratação com estrutura mais pobre, provavelmente mais porosa, sendo que boa parte destes poros permanecerá não preenchido.

O fato dos concretos confeccionados com RCC e RCT não apresentarem o mesmo desempenho de resistência à compressão axial, pode ser creditada ao processo de cura ao qual o concreto que deu origem ao resíduo foi submetido. Os resultados encontrados podem ser corroborados pelo visualizado na micrografia eletrônica realizada nas amostras de resíduos, onde se observou maior quantidade de poros presente na amostra de RCT do que na amostra de RCC, assim como para os resultados de absorção d água dos ARCs, principalmente se for analisada a absorção aos 10 minutos, conforme Tabela 17 apresentada anteriormente, sendo utilizada para o cálculo da água de compensação.

A análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 25, indica que os fatores de controle, bem como as interações de primeira e segunda ordem, entre os fatores, são significativas para um nível de significância (α) de 5%, uma vez que o valor de ‘p’ para cada destes fatores foi menor do que 0,05. Cabe observar que para fins de análise que o tipo de agregado foi representado pela absorção de água do material.

Tabela 25 – Análise de variância da resistência à compressão axial.

Fator	SQ	GL	MQ	Teste F	valor p	Significância
AC	1950,62	2	975,31	98,648	0,000000	S
ABS	969,68	2	484,84	49,039	0,000000	S
ID	1998,58	2	999,29	101,073	0,000000	S
AC*ABS	143,11	4	35,78	3,619	0,011012	S
AC*ABS	135,59	4	33,90	3,429	0,014358	S
ABS*ID	138,67	4	34,67	3,506	0,012878	S
AC*ABS*ID	172,76	8	21,60	2,184	0,043128	S

Onde: AC=Relação água aglomerante; ABS= Absorção de água do agregado; ID=Idade;

Ao analisar o gráfico das médias da Figura 34, é possível verificar como os concretos se comportam em relação a cada um dos fatores analisados. Conforme esperado na medida que aumenta a idade dos concretos, aumenta a resistência à compressão, assim como na medida que a relação água aglomerante aumenta, a resistência à compressão diminui. Para

todas as idades e todas as relações água aglomerante, os concretos com RCC apresentam o melhor desempenho.

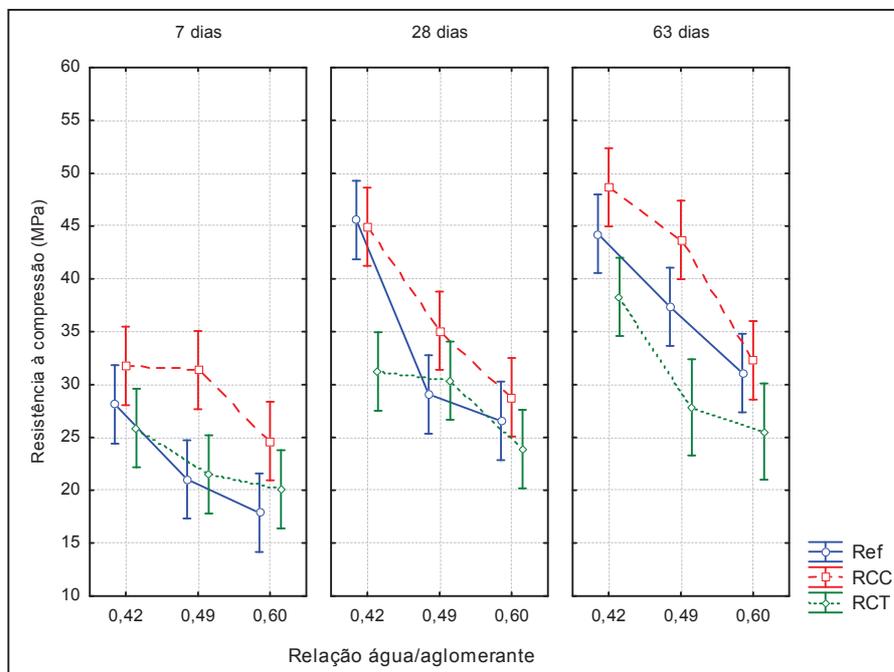


Figura 34 – Valores encontrados para as três novas matrizes de concreto com os dois tipos de resíduos utilizados.

4.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados médios obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para a idade de cura de 28 dias são apresentados na Tabela 26. Os valores individuais são apresentados nos apêndices.

Tabela 26 - Médias da resistência à tração por compressão diametral.

Traço do Concreto	Tipo de Agregado	Resistência (MPa)
Traço Pobre (a/c 0,6)	AGN	8,6
	RCC	9,2
	RCT	6,2
Traço Intermediário (a/c 0,49)	AGN	10,1
	RCC	10,5
	RCT	8,4
Traço Rico (a/c 0,42)	AGN	12,7
	RCC	12,9
	RCT	9,9

Onde: a/c=Relação água aglomerante (cimento+cinza volante); AGN= Agregado graúdo natural; RCC=Resíduo de cura convencional; RCT =Resíduo de cura térmica.

Ao compararem-se os valores médios encontrados para a resistência a tração por compressão diametral das amostras confeccionadas com RCC, ao concreto referência, verifica-se um aumento da resistência, sendo este acréscimo na ordem de 1,6 a 6,7%.

Resultados semelhantes a estes encontraram os autores Etxeberria, Vázquez e Marí (2007), os quais utilizaram diversos teores de substituição de agregado reciclado de concreto, observando em todas as situações melhores valores para resistência à tração. Os autores Sami e Abdelfatah (2009) verificaram em duas misturas de concreto confeccionadas com agregado reciclado de concreto de alta resistência, valores de resistência à tração iguais aos do concreto referência.

Já ao serem avaliados os valores médios encontrados para as amostras confeccionadas com RCT, ao concreto referência, observa-se que são na maioria inferiores, sendo esta diferença maior no traço pobre, encontrando-se resultados aproximadamente 30% menores.

Acredita-se na possibilidade de que novamente o comportamento observado tenha relação com o tipo de cura ao qual o resíduo de concreto foi submetido anteriormente, pois a resistência à tração é influenciada fortemente pelas características da matriz e da zona de transição do concreto.

A maior resistência à tração para a dosagem que empregou RCC, pode ser explicada pelas seguintes hipóteses:

- A existência de partículas não-hidratadas de cimento no agregado, as quais hidratam-se na nova mistura melhorando a aderência entre a pasta e o agregado. Este comportamento pode estar intimamente ligado às características da matriz e da zona de transição, uma melhoria nestas regiões pode ter ocasionado um aumento na resistência à tração.

- Ao processo de cura interna que ajuda na melhoria da aderência entre a pasta e o agregado através da movimentação da água presente no agregado para a pasta após o seu endurecimento.

Realizando-se uma análise para os resultados da resistência à compressão e à tração encontrados, poder-se-ia afirmar, que o tipo de cura empregada no resíduo a ser utilizado como agregado reciclado é fundamental para a decisão de qual emprego será dado ao material. Caso a proposta de utilização do resíduo seja para a confecção de uma nova matriz de concreto com função estrutural, uma maior investigação sobre o material é necessária.

Realizou-se análise estatística para os valores médios dos resultados da resistência à tração por compressão diametral, para os diversos traços, sendo realizada a proposição de um modelo.

A análise de variância (ANOVA) do modelo é apresentada na Tabela 27 e os parâmetros calculados para as variáveis independentes analisadas (fatores) na Tabela 28.

Tabela 27 - Anova do modelo para resistência à tração por compressão diametral.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	10	2723,52	272,352	138,4345	2,9548E-14
Resíduos	17	33,4453	1,96737		
Total Corrigido	26	134,407			

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

Tabela 28 - Parâmetro das variáveis analisadas para a resistência à tração por compressão diametral.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b0	8,58816	0,29188	29,4236	0,0000
AC	b1	-5,05E+00	4,35E+01	-0,1161	0,4543
ABS	b2	-1,26E+01	1,41836	-8,8669	0,0000
ACF	b3	1,15E+02	8,18E-06	14084558,6977	0,0000
AC^2	b11	145,392	0,489951	296,7480	0,0000
ABS^2	b22	-0,474603	149,088	-0,0032	0,4987
ACF^2	b33	-160,186	0,511099	-313,4148	0,0000
ABS*ACF	b23	17,6653	7,63734	2,3130	0,0150
ABS^2*ACF^2	b2233	0,653951	53,6455	0,0122	0,4952
AC*ABS*ACF	b123	-21,5471	4,7693	-4,5179	0,0001

Onde: AC= relação água aglomerante (cimento+cinza volante) inicial; ABS=absorção do agregado; ACF= relação água aglomerante (cimento+cinza volante) final.

A análise de variância (Tabela 27) do modelo resultou em um valor do coeficiente de determinação r^2 de 0,7511, indicando que o modelo ajusta 75,11% dos valores observados para a resistência à tração por compressão diametral e o valor 'p' do modelo menor que 0,01 indica que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99%. Considera-se neste caso um coeficiente de determinação 75% satisfatório.

As variáveis independentes ABS e ACF que descrevem o modelo e apresentam-se estatisticamente significativas, a um nível de confiança de 99%, sendo o valor de "p" menor que 0,01. Entretanto observou-se um valor de "p" de 0,4543, para a variável AC, um valor de "p" de 0,4987, para a interação da variável ABS com ela mesma e um valor de "p" de "0,4952" para a interação das variáveis $ABS^2 \times ACF^2$. Já a interação das variáveis ABS e ACF do modelo apresenta um nível de confiança de 95%, sendo "p" menor que 0,05. Desta forma, o modelo ajustado para a resistência a tração por compressão diametral está apresentado na Equação 10.

$$\begin{aligned}
 FT = & 8,58816 - 5,04675 \times AC / (-5,04675 \times AC - 12,5764 \times ABS + 115,21 \times ACF)^{1/3} + 145,392 \times AC^2 - \\
 & 0,474603 \times ABS^2 - 160,186 \times ACF^2 + 17,6653 \times ABS \times ACF + 0,653951 \times ABS^2 \times ACF^2 - \\
 & 21,5471 \times AC \times ABS \times ACF
 \end{aligned}
 \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

FT = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

AC = relação água aglomerante (cimento+cinza volante) inicial, com valores entre 0,42 e 0,60;

ABS = absorção do agregado (%), com valores entre 2,18 e 8,37;

ACF = relação água aglomerante (cimento+cinza volante) final, com valores entre 0,42 e 0,64;

A Figura 35 apresenta o efeito da variável agregado no comportamento de resistência à tração por compressão diametral.

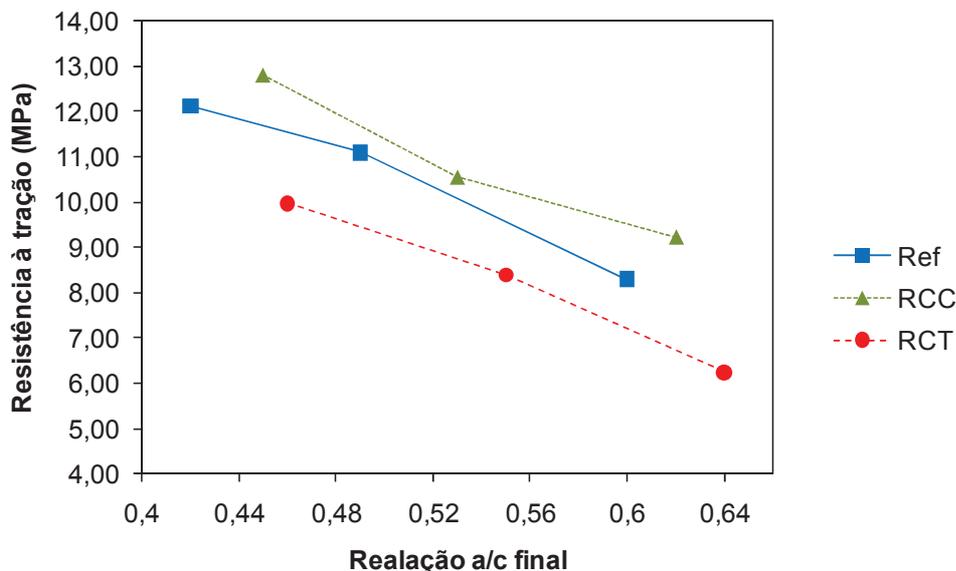


Figura 35 – Efeito da variável agregado no comportamento de resistência à tração por compressão diametral.

4.2 DURABILIDADE

Os resultados dos ensaios de durabilidade da propriedade de absorção de água são apresentados a seguir. As análises foram executadas com três corpos de prova, sendo realizada uma média dos valores encontrados expressa em tabela e apresentada em representação gráfica.

Os dados foram analisados por regressão múltipla não linear, considerando-se as variáveis de controle (ou fatores) propostas para esta pesquisa. Os resultados individuais

obtidos encontram-se no apêndice, enquanto que nos próximos itens são apresentadas as figuras com as médias e as curvas do modelo resultante da análise estatística. A análise estatística é apresentada na forma de tabelas com os parâmetros calculados para os fatores analisados, bem como a equação resultante do ajuste matemático.

4.2.1 Absorção de água por capilaridade

Na sequência, são apresentados os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, apresentados na forma de absorção de água em massa por área, medida em concretos com idade de 28 dias. A Tabela 29 apresenta os valores médios para o parâmetro. Os gráficos dos resultados obtidos ao longo do tempo, representando valores médios dos corpos de prova, são apresentados nas Figuras 36 a 38. Estas figuras são analisadas em dois diferentes estágios, o primeiro, onde ocorre a maior absorção de água, e o segundo, onde se percebe a saturação, com a estabilização da absorção. Os valores individuais são apresentados nos apêndices.

Tabela 29 – Médias da porcentagem de absorção de água ao longo do tempo.

Traço	Agregado	Absorção de Água (g/cm ²)															
		Tempo (raiz t (min))															
		0,00	1,00	1,41	1,73	2,00	2,24	3,16	4,47	5,48	7,75	15,49	18,97	37,95	53,67	65,73	75,89
Pobre	AGN	0,00	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,09	0,11	0,14	0,36	0,44	0,72	0,76	0,77	0,77
	RCC	0,00	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,28	0,36	0,68	0,79	0,81	0,81
	RCT	0,00	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,11	0,13	0,15	0,35	0,44	0,75	0,78	0,79	0,79
Intermediário	AGN	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,08	0,10	0,13	0,29	0,36	0,66	0,71	0,72	0,73
	RCC	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,19	0,24	0,42	0,55	0,61	0,64
	RCT	0,00	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,08	0,09	0,11	0,26	0,33	0,62	0,75	0,76	0,76
Rico	AGN	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,08	0,10	0,23	0,28	0,57	0,67	0,69	0,69
	RCC	0,00	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,08	0,10	0,11	0,25	0,31	0,59	0,69	0,72	0,73
	RCT	0,00	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,27	0,32	0,63	0,69	0,70	0,71

Onde: AGN= Agregado graúdo natural; RCC=Resíduo de cura convencional; RCT = Resíduo de cura térmica.

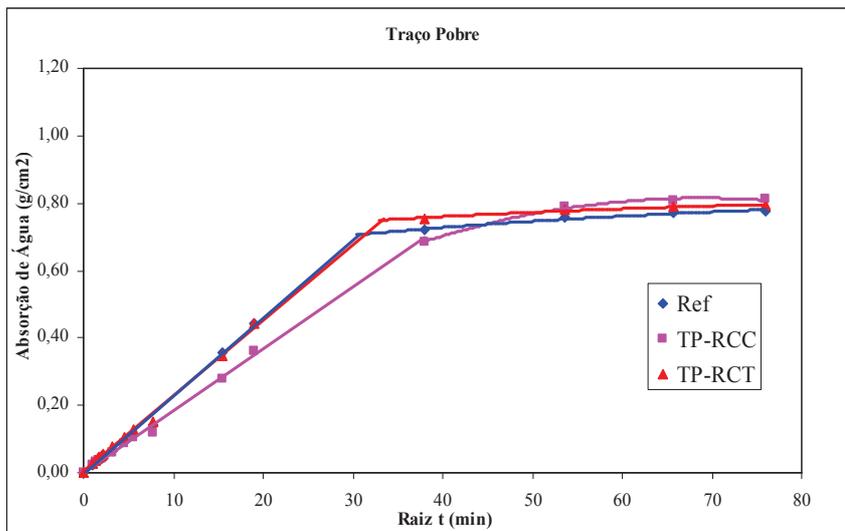


Figura 36– Absorção de água ao longo do tempo – Traço Pobre.

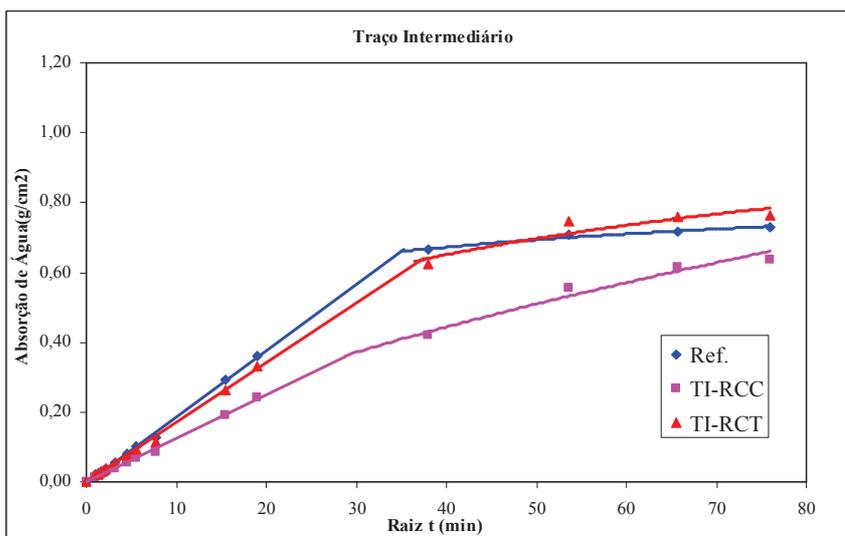


Figura 37– Absorção de água ao longo do tempo – Traço Intermediário.

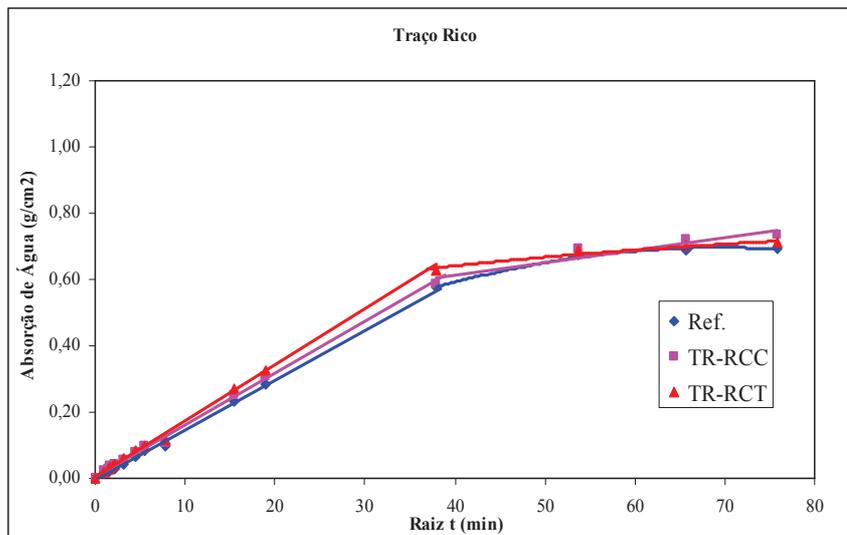


Figura 38– Absorção de água ao longo do tempo – Traço Rico.

A análise de variância (ANOVA) do modelo é apresentada na Tabela 30 e os parâmetros calculados para as variáveis independentes analisadas (fatores) são apresentados na Tabela 31.

Tabela 30 - Anova do modelo para absorção de água por capilaridade

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	9	14,8247	1,64719	3737,3196	0,0000
Resíduos	18	0,00793333	0,000440741		
Total Corrigido	26	0,0769852			

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

Tabela 31 - Parâmetro das variáveis analisadas para a absorção de água por capilaridade

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b0	13,9037	2,4881	5,5882	0,0000
AC	b1	-114,9310	25,0021	-4,5969	0,0001
ABS	b2	-0,2446	0,0773	-3,1634	0,0022
ACF	b3	37,0138	10,6442	3,4774	0,0010
AC*ABS*ACF	b123	-1,4406	0,6881	-2,0934	0,0238
AC*ABS^2	b122	-0,0201	0,0070	-2,8828	0,0042
AC*ACF^2	b133	-104,9780	20,4354	-5,1371	0,0000
ABS*ACF^2	b233	2,8286	0,6161	4,5913	0,0001
AC^2	b11	154,9610	29,5187	5,2496	0,0000

Onde: AC = relação água aglomerante (cimento+cinza volante) inicial; ABS = absorção do agregado; ACF= relação água aglomerante (cimento+cinza volante) final;

A análise de variância (Tabela 30) do modelo resultou em um valor de r^2 de 0,8969, indicando que o modelo ajusta 89,69% dos valores observados para absorção total de água e o

valor ‘p’ do modelo menor que 0,01 indica que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99%. Considerando a variabilidade do ARC e do ensaio, considera-se neste caso um coeficiente de determinação de 89% satisfatório.

As variáveis independentes que descrevem o modelo, bem como as interações entre as mesmas, de ABS_H₂O apresentam-se estatisticamente significativas, a um nível de confiança de 99%, sendo o valor de “p” menor que 0,01. Entretanto observou-se um valor de “p” de 0,0238, para a interação das variáveis ACxABSxACF. Uma vez que este valor de “p” apresenta-se menor que 0,05, este termo é estatisticamente significativo ao um nível de confiança de 95%. Desta forma, foi realizada a proposição de um modelo matemático para análise estatística da absorção de água por capilaridade, tal modelo ajustado para a absorção de água está apresentado na Equação 11.

$$\text{ABS_H}_2\text{O} = 13,9037 - 114,9310 \times \text{AC} - 0,2446 \times \text{ABS} + 37,0138 \times \text{ACF} - 1,4406 \times \text{AC} \times \text{ABS} \times \text{ACF} - 0,0201 \times \text{AC} \times \text{ABS}^2 - 104,9780 \times \text{AC} \times \text{ACF}^2 + 2,8286 \times \text{ABS} \times \text{ACF}^2 + 154,9610 \times \text{AC}^2 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

ABS_H₂O = absorção de água (g/cm²);

AC = relação água/(cimento+cinza volante) inicial, com valores entre 0,42 e 0,60;

ABS = absorção do agregado (%), com valores entre 2,18 e 8,37;

ACF = relação água/(cimento+cinza volante) final, com valores entre 0,42 e 0,64;

A Figura 39 apresenta os dados do ensaio de absorção de água por capilaridade com base no modelo proposto, para as três matrizes de concreto confeccionadas, com relação ao tipo de agregado utilizado no programa experimental.

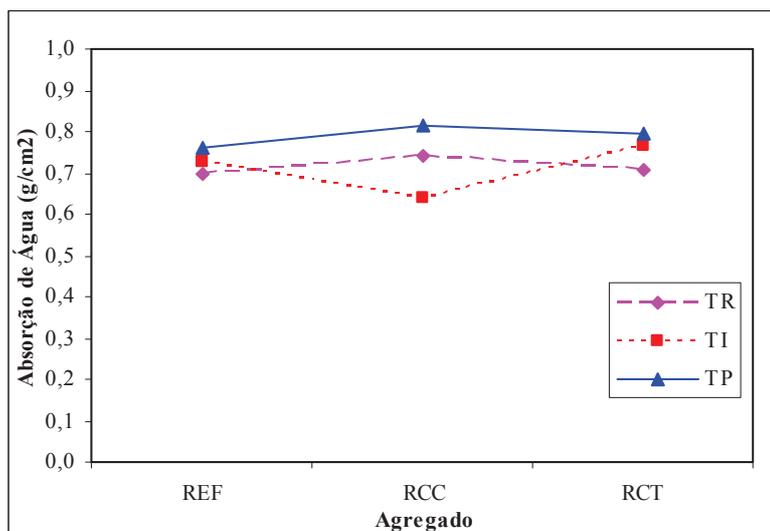


Figura 39 - Absorção de água por capilaridade em relação aos diferentes tipos de agregado.

Quanto aos resultados encontrados para a absorção de água por capilaridade nas amostras confeccionadas com agregado reciclado observa-se um aumento tanto para as contendo RCC, resíduo de concreto oriundo de cura convencional, quanto para as contendo RCT, resíduo de concreto oriundo de cura térmica. Este comportamento deve-se a argamassa aderida ao agregado, a qual confere ao mesmo, características de maior absorção, quando comparado ao agregado natural. Estas características são repassadas a nova matriz de concreto confeccionada com o material.

Para os traços intermediário e rico, confeccionados com RCC, percebe-se um aumento da absorção de água, ao comparar-se ao concreto referência, na ordem de 6,5 e 6,7%, respectivamente, não sendo o mesmo comportamento percebido no traço intermediário, ocorrendo uma menor absorção. Esperava-se que todas as amostras confeccionadas com este agregado apresentassem maior absorção, podendo o comportamento diferenciado do traço intermediário ser atribuído a possíveis problemas de adensamento dos corpos de prova ou ainda a erros de ensaio.

Já para os resultados da absorção de água dos concretos confeccionados com RCT, percebe-se um aumento da porcentagem de absorção em todos os traços estudados, variando de 1,5 a 5,5%.

Em estudos realizados pelos autores Grdic et. al., (2010), com diversos teores de substituição de agregado graúdo reciclado pelo natural, foram observados aumentos de absorção de água de até 0,92%, para a substituição total. Já na pesquisa desenvolvida pelos autores Evagelista e Brito (2010), com agregados finos reciclados de concreto, observou-se aumento de 46% da absorção de água quando comparado ao concreto referência, para as amostras com substituição total de agregado natural por reciclado, sendo este valor bem mais significativo que o encontrado pelo primeiro autor citado.

Cabe observar que o aumento de absorção de água verificado nos resultados encontrados nesta pesquisa não pode ser considerado significativo quando extrapolado para a escala real.

Em virtude da porcentagem de absorção de água, para o traço intermediário, confeccionado com RCC, não estar de acordo com a tendência apresentada pelas amostras num geral, optou-se por recuperar este valor por interpolação, sendo encontrado nova absorção de água com valor de 0,77%, realizando-se nova análise estatística, conforme proposto por Kulakowski (2002).

O modelo proposto será o mesmo, sendo apresentada nova análise de variância (ANOVA) do modelo, Tabela 32, com novos parâmetros calculados para as variáveis independentes analisadas (fatores) na Tabela 33.

Tabela 32 - Anova do modelo para absorção de água por capilaridade com recuperação do valor para o traço intermediário.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	9	15,3746	1,70829	3875,9498	0,0000
Resíduos	18	0,00793333	0,00044		
Total Corrigido	26	0,0446296			

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

Tabela 33 - Parâmetro das variáveis analisadas para a absorção de água por capilaridade com recuperação do valor para o traço intermediário.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b0	2,8040	2,4881	1,1270	0,1357
AC	b1	-21,9928	25,0021	-0,8796	0,1941
ABS	b2	-0,0483	0,0773	-0,6240	0,2694
ACF	b3	8,9852	10,6442	0,8441	0,2036
AC*ABS*ACF	b123	0,1510	0,6881	0,2194	0,4141
AC*ABS ²	b122	-0,0066	0,0070	-0,9472	0,1767
AC*ACF ²	b133	-18,5541	20,4354	-0,9079	0,1867
ABS*ACF ²	b233	0,1576	0,6161	0,2558	0,4002
AC ²	b11	26,8149	29,5187	0,9084	0,1865

Onde: AC = relação água aglomerante (cimento+cinza volante) inicial; ABS = absorção do agregado; ACF= relação água aglomerante (cimento+cinza volante) final;

A análise de variância (Tabela 32) do modelo resultou em um valor de r^2 de 0,8222, indicando que o modelo ajusta 82,22% dos valores observados para absorção total de água e o valor 'p' do modelo menor que 0,01 indica que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99%. Considerando a variabilidade do ARC e do ensaio, verifica-se, neste caso, um coeficiente de determinação de 82%.

As variáveis independentes que descrevem o modelo, bem como as interações entre as mesmas não apresentam-se estatisticamente significativas, Desta forma, o modelo ajustado para a absorção de água está apresentado na Equação 12.

$$ABS_{H_2O} = 2,8040 - 21,9928 \times AC - 0,0483 \times ABS + 8,9852 \times ACF + 0,1510 \times AC \times ABS \times ACF - 0,0066 \times AC \times ABS^2 - 18,5541 \times AC \times ACF^2 + 0,1576 \times ABS \times ACF^2 + 26,8149 \times AC^2 \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

ABS_{H₂O} = absorção de água (g/cm²);

AC = relação água aglomerante (cimento+cinza volante) inicial, com valores entre 0,42 e 0,60;

ABS = absorção do agregado (%), com valores entre 2,18 e 8,37;

ACF = relação água aglomerante (cimento+cinza volante) final, com valores entre 0,42 e 0,64;

A Figura 40 apresenta os dados do ensaio de absorção de água por capilaridade com base no modelo proposto, com os valores recuperados.

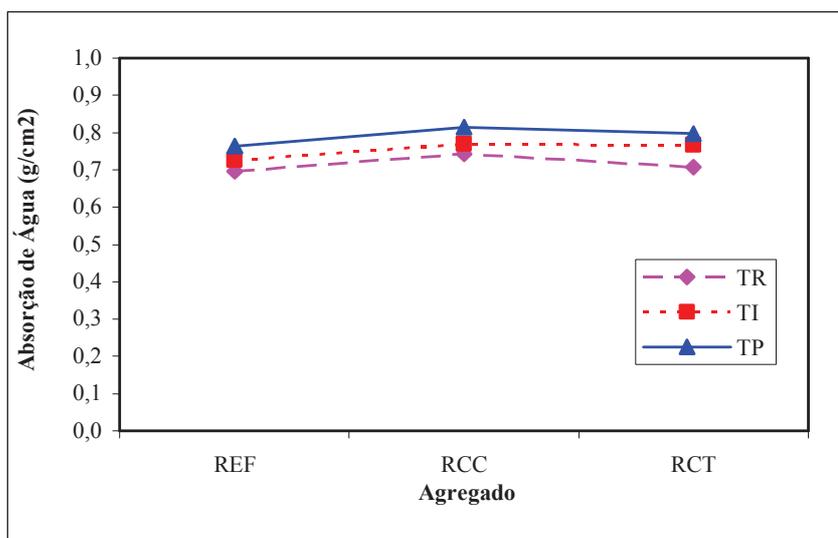


Figura 40 - Absorção de água por capilaridade em relação aos diferentes tipos de agregado.

4.3 MONITORAMENTO DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DAS REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO

Os ensaios de monitoramento da evolução da temperatura do concreto dos traços pobre, intermediário e rico, dispostas em calorímetro semi-adiabático, foram divididos em dois segmentos a serem avaliados, com e sem a presença de aditivo superplastificante.

A Tabela 34 apresenta os valores de início e fim de tempo (min), onde ocorre a evolução da temperatura das reações de hidratação dos concretos, bem como os respectivos valores desta temperatura (°C), sendo as amostras de concreto confeccionadas sem a presença de aditivo.

Tabela 34 – Tempo de evolução da temperatura das reações de hidratação e a respectiva temperatura, das amostras confeccionadas sem a presença de aditivo.

Traço	Tempo (min) de Evolução da Temperatura		Evolução da Temperatura (°C)	
	Início	Fim	Início	Fim
TP	258	716	23,98	29,08
TP-RCT	231	776	24,08	27,92
TP-RCC	189	601	25,79	28,24
TI	223	742	23,66	30,22
TI-RCT	144	697	25,52	34,00
TI-RCC	149	611	27,99	32,90
TR	157	641	24,55	33,44
TR-RCT	110	719	23,18	32,91
TR-RCC	112	561	29,06	36,82

As Figuras 41 a 43 apresentam a representação gráfica do monitoramento da evolução da temperatura das reações de hidratação do concreto, expressa em °C, das amostras referência e confeccionadas com RCC e RCT ao longo do tempo, expresso em minutos.

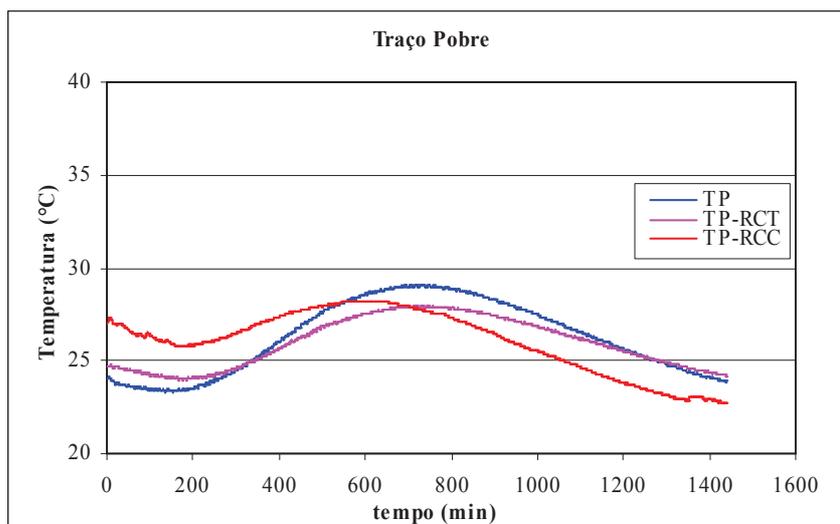


Figura 41- Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo-Traço Pobre.

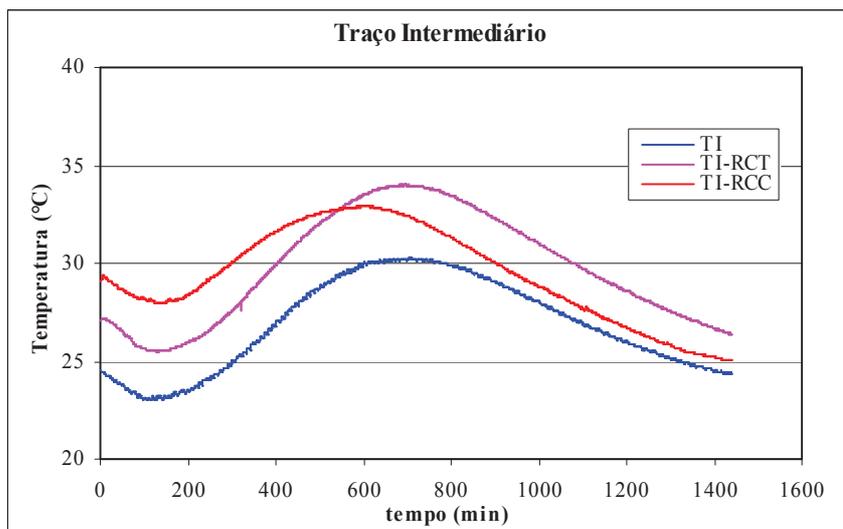


Figura 42 – Evolução da temperatura das reações de hidratação longo do tempo-Traço Intermediário.

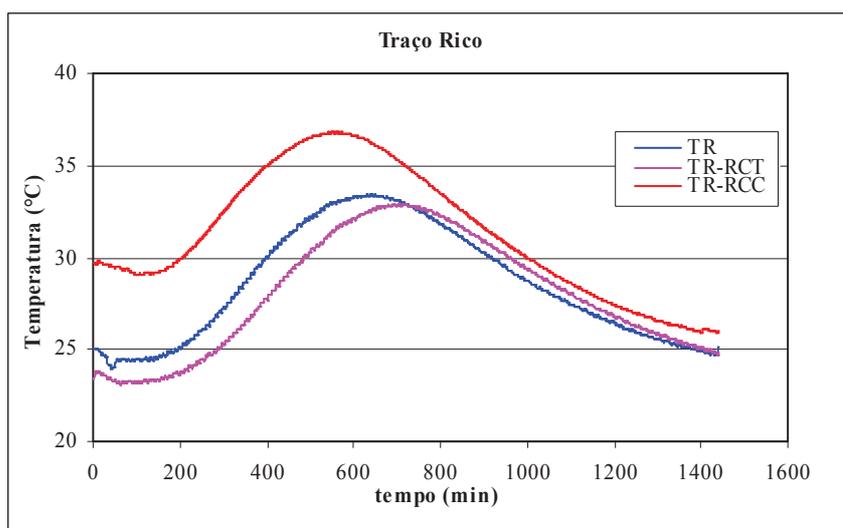


Figura 43 – Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo-Traço Rico.

A tendência de comportamento visualizada nas curvas para os três traços de estudo pode ser observada quanto ao início do tempo de evolução da temperatura das reações de hidratação, sendo menores para os concretos contendo RCT e RCC ao comparar-se aos concretos referência. Este comportamento pode estar associado a frações de cimento aderidas ao agregado reciclado que até então não tenham reagido e passem a reagir na nova matriz acelerando o início do tempo de evolução da temperatura das reações de hidratação do concreto.

Outra observação importante realizada é quanto à temperatura, pois a mesma apresenta-se mais elevada no início da evolução para as amostras confeccionadas com RCC ao serem comparadas às confeccionadas com RCT e aos concretos referência. Este comportamento pode ter relação com a quantidade de argamassa aderida ao agregado e ao número de reações existentes, que em maior quantidade podem estar emitindo mais calor.

A Tabela 35 apresenta os valores de início e fim de tempo (min), onde ocorre a evolução da temperatura das reações de hidratação do concreto, bem como os respectivos valores desta temperatura (°C), das amostras confeccionadas com a presença de aditivo.

Tabela 35 - Tempo de evolução da temperatura das reações de hidratação e a respectiva temperatura, das amostras confeccionadas com a presença de aditivo.

Traço c/ aditivo	Tempo (min) de Evolução da Temperatura		Evolução da Temperatura (°C)	
	Início	Fim	Início	Fim
TP	3,50	11,50	26,77	30,37
TP-RCT	2,47	12,77	25,48	32,24
TP-RCC	2,75	12,47	25,65	30,65
TI	2,83	12,43	25,03	33,36
TI-RCT	2,73	12,97	25,27	33,05
TI-RCC	2,40	12,15	25,14	33,35
TR	2,45	10,53	27,47	37,30
TR-RCT	2,48	11,80	24,10	33,15
TR-RCC	2,65	13,42	27,84	39,23

As Figuras 44 a 46 apresentam a representação gráfica do monitoramento da evolução da temperatura das reações de hidratação do concreto, expressa em °C, das amostras referência e confeccionadas com RCC e RCT, contendo aditivo superplastificante, ao longo do tempo, expresso em minutos.

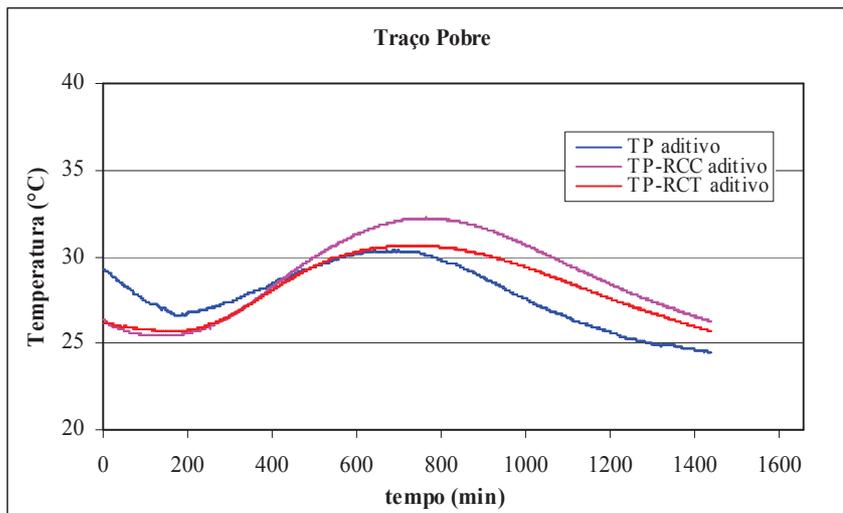


Figura 44 – Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo das amostras contendo aditivo superplastificante -Traço Pobre.

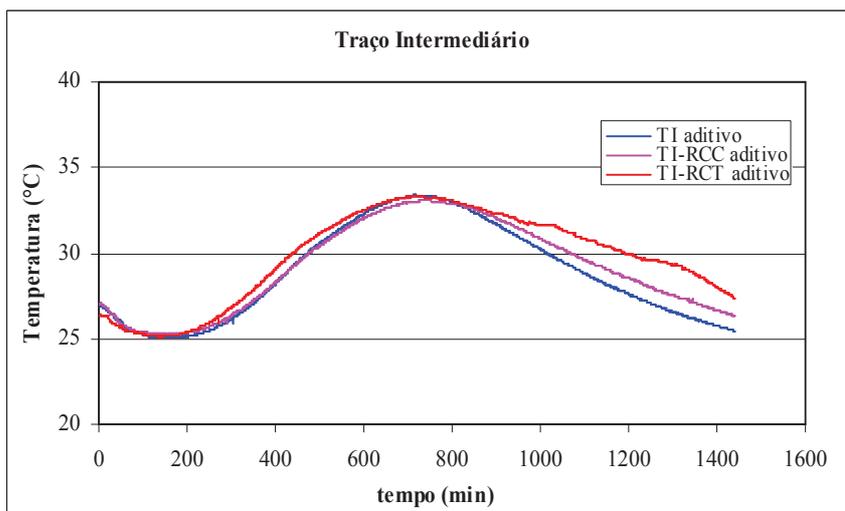


Figura 45 – Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo das amostras contendo aditivo superplastificante -Traço Intermediário.

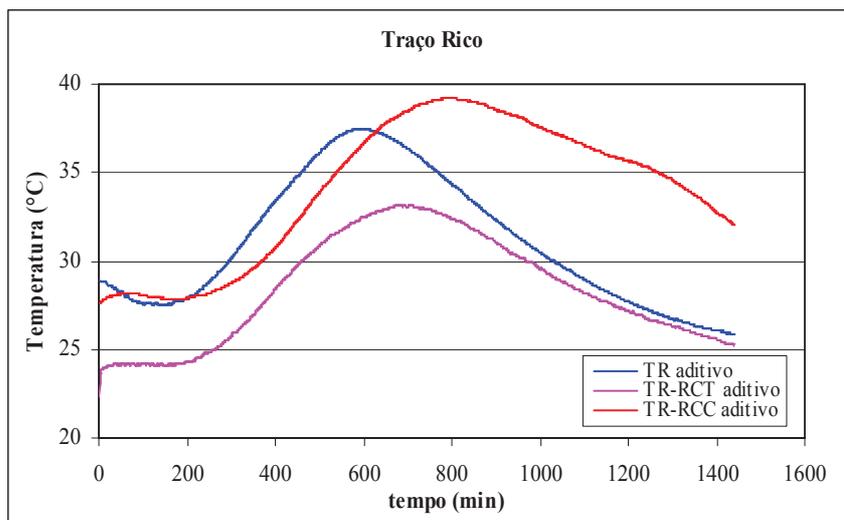


Figura 46 – Evolução da temperatura das reações de hidratação ao longo do tempo das amostras contendo aditivo superplastificante -Traço Rico.

Nas amostras confeccionadas com aditivo superplastificante foi observada uma diminuição geral dos inícios dos tempos de evolução da temperatura das reações de hidratação dos concretos, este comportamento pode ser atribuído à característica de aceleração do aditivo utilizado, apesar de não existirem informações técnicas do fabricante, que confirme tal característica.

Não foi verificada nenhuma outra tendência de comportamento nas amostras confeccionadas com agregado reciclado que as diferencie das amostras do concreto referência.

Ao compararem-se as amostras confeccionadas sem aditivo das contendo aditivo verifica-se um aumento geral das temperaturas das reações de hidratação dos concretos.

5 CONCLUSÃO

Nos próximos itens são realizadas considerações finais a respeito do trabalho e sugestões de desenvolvimento de trabalhos futuros.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem muitas pesquisas sobre a utilização do agregado reciclado misto para a fabricação de novas matrizes de concreto, sendo que a maioria destas destaca ser este material heterogêneo, observando a importância do conhecimento aprofundado das características do mesmo. Com objetivo de suprir esta necessidade, o meio científico, há pouco tempo, deu início a estudos sobre as principais características dos constituintes dos agregados reciclados oriundos de resíduos da construção e demolição e seu comportamento frente às novas matrizes de concreto confeccionadas. Dentre os materiais constituintes dos agregados reciclados, o concreto, foco do trabalho desenvolvido, é componente importante, sendo fundamental o conhecimento de suas propriedades.

A partir dos resultados encontrados, e tendo em vista os objetivos estabelecidos no presente trabalho, podem ser tecidas as considerações expostas na sequência, que retringem-se ao escopo do trabalho.

Verificar a influência da incorporação do ARC, sendo neste trabalho utilizado resíduo oriundo de concreto, cura convencional, ao ar, e cura térmica, a vapor d'água, com teor de substituição de 50%, na produção de novos concretos, conforme propriedades relacionadas a seguir, quanto à viabilidade técnica de utilização de resíduos oriundos da pré-fabricação.

1) quanto às propriedades mecânicas, foram obtidas as seguintes conclusões:

- O estudo verificou que o tipo de cura, ao qual o concreto que deu origem ao resíduo foi submetido influencia diretamente nas propriedades mecânicas, resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral. De maneira geral, pode-se dizer que os concretos confeccionados com RCC, cura convencional, ao ar, apresentaram um acréscimo tanto na resistência à compressão axial, como na resistência à tração. Para a resistência à compressão axial o aumento visualizado foi de até 50% e para a tração os valores não apresentaram aumento representativo, sendo até 6,7% superiores quando

comparados à referência. Já os concretos confeccionados com RCT, cura térmica, com vapor d'água, apresentaram um decréscimo tanto na resistência à compressão axial, como na resistência à tração. Para a resistência à compressão axial o decréscimo visualizado foi de até 32% e para a tração de até 30% quando comparados à referência;

- Para a propriedade de resistência à compressão axial, medidos nas idades de 7 a 63 dias, foram realizados ajustes das curvas de Abrams pelo método dos mínimos quadrados retornando um r^2 que variou de 0,7544 a 0,9635 para o RCC indicando que este ajuste representa 75,44 a 96,35% dos valores observados, existindo de uma forma geral desempenho compatível ou ligeiramente superior ao concreto de referência. Já para o RCT o ajuste das curvas de Abrams pelo método dos mínimos quadrados retornou um r^2 que variou de 0,7970 a 0,9201, indicando que este ajuste representa 79,70 a 92,01% dos valores observados, existindo de uma forma geral um desempenho desfavorável ou inferior ao concreto de referência;
- Para a propriedade de resistência a tração, a observação realizada através de análise estatística pelo método de regressão não linear, através do modelo proposto, apresentou que as variáveis independentes de absorção de água do agregado e a relação água aglomerante (cimento+cinza volante) final são significativas para o modelo proposto, não existindo significância da variável relação água aglomerante (cimento+cinza volante) inicial. O modelo proposto apresentou r^2 de 0,75, sendo 75% satisfatório;
- O tipo de cura, ao qual o concreto que deu origem ao resíduo, foi submetido, afeta diretamente o comportamento das propriedades mecânicas das novas matrizes de concreto, existindo relação com a porosidade do ARC, corroborado pela análise de microscopia eletrônica de varredura.

2) quanto à propriedade de durabilidade, foram obtidas as seguintes conclusões:

- O estudo verificou que ocorreu aumento da absorção de água tanto para as matrizes confeccionadas com RCC, tanto para as confeccionadas com RCT. O

aumento da absorção variou de 6,5 % a 6,7% e para o RCC e de 1,5 a 5,5% para o RCT, quando comparadas à referência;

- Apesar de existir um aumento da absorção de água com a utilização dos agregados reciclados de concreto, verificou-se que este aumento não é estatisticamente significativo para nenhuma das variáveis propostas;
- As absorções de água apresentadas pelas matrizes de concreto confeccionadas, em nível de aplicabilidade em escala real, não podem ser consideradas significativas.

3) quanto à evolução da temperatura das reações de hidratação do concreto, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- O estudo verificou que ocorre diminuição do início do tempo de evolução das temperaturas de hidratação dos concretos quando se comparam as matrizes confeccionadas com ARC as amostras referência. Observaram-se valores de início da evolução das temperaturas maiores para as amostras confeccionadas com RCC quando comparadas às amostras confeccionadas com RCT e as referências;
- Ao compararem-se as amostras confeccionadas com aditivo superplastificante às confeccionadas sem a presença de aditivo foi percebido menores valores de tempo inicial da evolução da temperatura das reações de hidratação dos concretos. Este comportamento pode ser atribuído ao aditivo, contudo não existem informações técnicas por parte do fabricante de que este produto possua em sua formulação algum agente acelerador de pega.

De uma maneira geral para os resultados desta pesquisa, pode-se afirmar que os dois tipos de agregados apresentam diferenças entre si, sendo necessária caracterização dos mesmos para viabilizar o seu emprego na fabricação de novos concretos. Nesta pesquisa os concretos com agregado reciclado oriundos de cura convencional apresentaram desempenho compatíveis aos concretos de referência, o que tecnicamente tornaria viável o seu emprego na produção de peças pré-fabricadas. No entanto os concretos com agregados oriundos de cura térmica não apresentaram o mesmo comportamento e o desempenho foi inferior ao concreto

de referência. Em virtude dos resultados obtidos neste trabalho, é importante ressaltar a necessidade de caracterização do ARC, por ser um material com variabilidade e diferentes porosidades devendo sua utilização ser cautelosa, pois o seu reaproveitamento ocorre com a sua inserção dentro de uma matriz de concreto que também é um material heterogêneo. A caracterização do agregado reciclado de concreto é essencial para se ter uma maior confiabilidade em sua utilização, já que o mesmo depende de inúmeros fatores, conforme apresentado nos resultados deste trabalho.

Deve-se ressaltar que, a porosidade do concreto do qual o ARC é oriundo, a qual nesse estudo está diretamente vinculada ao tipo de cura a que o concreto pai foi submetido, interfere diretamente nas propriedades mecânicas da nova matriz de concreto. Quanto à propriedade de durabilidade, absorção de água, concluiu-se que o ARC aumenta a absorção, não sendo este aumento relevante em escala real. Sendo assim, o trabalho trouxe algumas respostas e dúvidas também sobre a utilização do ARC em novos concretos e a sua influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade. Desta forma, as lacunas abertas a partir deste trabalho são postas como sugeridas para futuros trabalhos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os questionamentos surgidos a partir deste estudo, e que não puderam ser contemplados no escopo do trabalho, são formuladas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- estudar as mesmas propriedades do trabalho em questão com moldagens realizadas em sala climatizada, umidade e temperatura controladas, e realizando o adensamento dos corpos de prova com vibração mecânica, diminuindo as variáveis do estudo;
- estudar outras propriedades mecânicas com a inserção de ARC, oriundo de indústria de pré-fabricados, tais como módulo de elasticidade e retração;
- testar a inserção de ARC em escala real, verificando as propriedades mecânicas das peças desenvolvidas pela indústria de pré-fabricados em concreto;
- testar a inserção de ARC em escala real, verificando as propriedades de durabilidade das peças desenvolvidas pela indústria de pré-fabricados em concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C125-07**: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregate. Philadelphia, 2007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 201. **Guide to Durable Concrete**. Detroit, 2001.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

ANGULO, S. C.; KAHN, H.; JOHN, V. M.; ULSEN, C. **Metodologia de Caracterização de Resíduos de Construção e Demolição**. In: VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas aplicações. Anais. São Paulo, 2003. CT 206 – IBRACON.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C.; KAHN, H. **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados Separados por Líquidos Densos**. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais. São Paulo, 2004. ENTAC.

ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos da Construção e Demolição Reciclados e a Influência de suas Características no Comportamento de Concretos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM, disponível em: <<http://www.abesc.org.br/pdf/mambiente.pdf>>, acesso em: 15 de janeiro de 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DO CONCRETO, disponível em: <<http://www.abesc.org.br/pdf/mambiente.pdf>>, acesso em: 10 de fevereiro de 2011.

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

_____. **NBR 5739. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6118. Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7215. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 7221. Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7225. Materiais de pedra e agregados naturais**. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 7809. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2006.

_____**NBR 11579. Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).** Rio de Janeiro, 1991.

_____**NBR 12819. Concreto e Argamassa - Determinação da elevação adiabática da temperatura.** Rio de Janeiro, 1993.

_____**NBR 15.116. Agregados Reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural.** Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR NM 45. Agregados – Determinação da massa unitária e espaço de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

_____**NBR NM 52. Agregado miúdo – Determinação de massa aparente e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

_____**NBR NM 53. Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2002.

_____**NBR NM 65. Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003.

_____**NBR NM 76. Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 1998.

_____**NBR NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

BALLISTA, L. P. **Microconcretos Leves Estruturais com Agregados Graúdos Reciclados Modificados com Látex Estireno-Butadieno – Estudo das Propriedades Físicas, Mecânicas e de Durabilidade.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

BENINI, H. **Reaproveitamento de concreto fresco dosado em central com uso de aditivo estabilizador de hidratação.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.

BRUM, D. D. **Diagnóstico da Gestão dos Resíduos Sólidos de Construção Civil e Demolição (RCD) no Município de Campinas-SP.** Universidade Federal de São Carlos e do Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento, Campinas, SP, 2006.

BUTTLER, A. M. **Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto – Influência da Idade de Reciclagem nas Propriedades dos Agregados e Concretos Reciclados.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

BUTTLER, A. M. **Uso de Agregados Reciclados de Concreto em Blocos de Alvenaria Estrutural.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

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

CARNEIRO, A. P. *et. al.* **Características do entulho e do agregado reciclado.** In: CARNEIRO A. P. *et. al.* (ORG). **Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção.** Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001a, p.142-186.

CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 69–80, 2011.

CAVALHEIRO, A. P. **Avaliação da Viabilidade da Substituição de Agregado Graúdo Natural por Agregado Reciclado de Concreto na Fabricação de Componentes Estruturais Pré-Moldados de Concreto**. Dissertação (Mestrado) em desenvolvimento – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

CNZYCD Disponível em: <<http://portuguese.alibaba.com/product-free-img/our-hammer-mill-best-choice-200299879.html>>, acesso em: 19 de fevereiro de 2010.

CONAMA (2002) – Conselho Nacional do Meio Ambiente – **Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>, acesso em: 20 de março de 2010.

CONAMA (2004) – Conselho Nacional do Meio Ambiente – **Resolução CONAMA 348 de 16 de agosto 2004**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res04/res34804.xml>>, acesso em: 15 de janeiro de 2010.

DOMINGO-CABO, A.; LÁZARO, C.; LÓPEZ-GAYARRE, F.; SERRANO-LÓPEZ, M. A.; SERNA, P., CASTAÑO-TABARES, J. O. **Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete**. *Construction and Building Materials*. v. 23, p. 2545-2553, 2009.

EGUCHI, K.; TERANISHI, K.; NAKAGOME, A.; KISHIMOTO, H.; SHINOZAKI, K.; NARIKAWA, M. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. **Construction and Building Materials**. v. 21, p.1542–1551, 2007.

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

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

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**. v.29, n. 5, p.397-401, 2007.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**. v. 32, p. 9–14, 2010.

FERREIRA, R. M. **Optimização da vida útil das estruturas de betão armado**. In: 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia das Estruturas-2006.

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

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados Reciclados de Resíduos de Concreto-Um Novo Material para Dosagens Estruturais**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2001.

GRDIC, Z. J.; TOPLICIC-CURCIC, G. A.; DESPOTOVIC, I. M.; RISTIC, N. S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled. **Construction and Building Materials**. v.24, p. 1129–1133, 2010.

- GUERREIRO, M. R. F. **Utilização de Aditivo Estabilizador de Hidratação (AEH) como Proposta de Reciclagem dos Resíduos de Concreto Usinado**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Gestão Tecnológica. Centro Universitário FEEVALE, Novo Hamburgo, RS, 2007.
- GUNÇAN, N. F.; TOPÇU, I. B. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**. v.25, n.7, p.1385-1390, jun, 1995.
- IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *On-line*. Disponível em: <http://ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1347&id_pagina=1>, acesso em: 10 de fevereiro de 2011.
- IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *On-line*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000010.pdf>>, acesso em: 13 de fevereiro de 2011.
- JAILLON, L.; POON, C. S. The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector. **Automation in Construction**. v.18, p.239-248, 2009.
- JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.
- JOHN, V.M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: CASSA, J.C.S; CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal., p. 311, 2001.
- JOYALCRUSHER Disponível em: <<http://www.joyalcrusher.com/pt/products/Crushing/Roller-Crusher.html>>, acesso em: 19 de fevereiro de 2010.
- KATHIB, J. M. Properties of concretes incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**. v.35, n.4, p.763-769, 2005.
- KATZ, A. Properties of concretes made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**. v.33, p.703-711, 2003.
- KAZMIERCZAK, C.S.; KULAKOWSKI, M. P.; BOITO, D.; GARCIA, A. C.A. **Estudo comparativo da geração de resíduos de construção e demolição em São Leopoldo e NovoHamburgo**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído-ENTAC, 2006.
- KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa** Tese (Doutorado) – Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.
- KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. **Cement e Concrete Composites**. v. 31, p. 622–627, 2009.
- LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

- LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1997.
- LIMA, J.A.R. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.
- LIU, Y.; TIAN, Y.; CHANG, T.; CHANG, C. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**. v.34, p.1373-1380, 2004.
- LOVATO, P. S. **Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos da Construção e Demolição para Utilização em Concreto**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.
- MEHTA, P. K, MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo. Editora PINI, 1ª Edição, p.573, 1994.
- MEHTA, P. K, MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo. Editora IBRACON, 1ª Edição, p. 289-307 e 373-370, 2008.
- MONTGOMERY, D. G. **Workability and Compressive Strength Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates**. In: Proceedings of the International Symposium: “Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”, Thomas Telford, London, p. 287-296, 1998.
- MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia: subsídios para uma gestão sustentável**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2006.
- NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. Editora PINI, São Paulo, 2ª Edição, Cap. 1, 2 e 3. 1997.
- OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement e Concrete Composites**. v. 27 p. 315–318, 2005.
- 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. **Materiais descartados pelas obras de construção civil: estudo dos resíduos de concreto para reciclagem**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2002.
- PADIMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 829–836, 2009.
- PINTO, T. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos sólidos da Construção Urbana**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.
- POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**. v.16, p.281-289, 2002.

- PSQ** – PROGRAMA SETORIAL DA QUALIDADE. *On-line*. Disponível em: <http://sucab.ba.br/2006/psq/psq_pedrabritada.doc>, acesso em: 15 de março de 2010.
- RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environmental**. v.42, p.407-415, 2007.
- RAKSHVIR, M.; BARAI, S. V. Studies on recycled aggregates-based concrete. **Waste Management and Research**, v. 24, p. 225-233, 2006.
- RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. The Properties of Recycled Concrete. **Concrete International**. v.19, n.7, p.56-60, jul, 1997.
- RILEM, C. TC 119 TE, **Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages**. TCE1: Adiabatic and Semi-adiabatic Calorimetry to Determine the Temperature Increase in Concrete due to Hydration Heat of the Cement, 1999.
- RILEM, C. TC 166 PCD, Determination of the Capillary Absorption of Water of Hardened Concrete. **Materials and Structures / Materiaux ET constructions**, vol. 32, p. 178-179, Abr. 1999.
- SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**. v.31, n.5, p.707-712, 2001.
- SANI, D.; MORICONI, G.; FAVA, G.; CORINALDESI, V. Leaching and mechanical behavior of concrete manufactured with recycled aggregates. **Waste Management**. v. 25, n. 2, p.177-182, 2005.
- 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.
- SCHEN, L.; TAM, V. W.; LI, C. Benefit analysis on replacing *in situ* concreting with precast slabs for temporary construction works in pursuing sustainable construction practice. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 53, p. 145–148, 2009.
- SCOTT HOOD, R. S. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduos de Construção e Demolição como Agregado Miúdo Reciclado na Confecção de Blocos de Concreto para Pavimentação**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.
- SILVA, C. A. R. **Aplicação do Conceito de Maturidade em Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2004.
- SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. São Paulo: Editora PINI, 1998.
- TABSH, S. W.; ABDELATAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1163–1167, 2009.
- TOPÇU, I. B. Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 27, n. 12, p.1817-1823,1997.
- TOPÇU, I. B.; SENDEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**. v.34, n.8, p.1307-1312, 2004.
- TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado frente à penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. 2010.

TU, T.; CHEN, I.; HWANG, C. Properties of HPC with recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**. v.36, n.8, p.943-950, 2006.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**. v.35, n.6, p.1187-1194. jun. 2005.

XIAO, J.; FALKNER, H. Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars. **Construction and Building Materials**. v. 21, p.395-401, 2007.

XIAO, J.; SUN, Y.; FALKNER, H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete. **Engineering Structures**. v. 28, p. 1-8, 2006.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SCOCZYLAS, F.; WINQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**. v.25, p.223-232, 2003.

ZENITH MINING AND CONSTRUCTION Disponível em: <<http://www.zenithcrusher.com/pt/Britador-de-impacto.html>>, acesso em: 19 de fevereiro de 2010.

ZORDAN, S. E. Ficha Técnica: **Entulho da indústria da construção civil**. São Paulo. Disponível em: <http://reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm>, acesso em: 05 de fevereiro de 2010.

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

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

APÊNDICES

Tabela A1- Resultados observados de resistência à compressão axial dos concretos (MPa).

Traço	A/C	AG ABS(%)	ACF	ID	FC(MPa)	FC Média (MPa)
TR-01	0,42	2,18	0,42	7	27,2	28,1
TR-02	0,42	2,18	0,42	7	27,3	
TR-03	0,42	2,18	0,42	7	29,9	
TR-01	0,42	2,18	0,42	28	42,3	45,6
TR-02	0,42	2,18	0,42	28	47,1	
TR-03	0,42	2,18	0,42	28	47,3	
TR-01	0,42	2,18	0,42	63	37,6	44,3
TR-02	0,42	2,18	0,42	63	46,6	
TR-03	0,42	2,18	0,42	63	48,6	
TR-RCC-01	0,42	5,63	0,45	7	30,10	31,8
TR-RCC-02	0,42	5,63	0,45	7	32,10	
TR-RCC-03	0,42	5,63	0,45	7	33,10	
TR-RCC-01	0,42	5,63	0,45	28	42,00	44,9
TR-RCC-02	0,42	5,63	0,45	28	46,10	
TR-RCC-03	0,42	5,63	0,45	28	46,70	
TR-RCC-01	0,42	5,63	0,45	63	44,20	48,7
TR-RCC-02	0,42	5,63	0,45	63	49,50	
TR-RCC-03	0,42	5,63	0,45	63	52,30	
TR-RCT-01	0,42	8,37	0,46	7	23,60	25,9
TR-RCT-02	0,42	8,37	0,46	7	24,20	
TR-RCT-03	0,42	8,37	0,46	7	29,90	
TR-RCT-01	0,42	8,37	0,46	28	33,30	31,2
TR-RCT-02	0,42	8,37	0,46	28	34,20	
TR-RCT-03	0,42	8,37	0,46	28	26,20	
TR-RCT-01	0,42	8,37	0,46	63	37,40	38,3
TR-RCT-02	0,42	8,37	0,46	63	37,50	
TR-RCT-03	0,42	8,37	0,46	63	40,00	
TI-01	0,49	2,18	0,49	7	18,70	21,0
TI-02	0,49	2,18	0,49	7	21,20	
TI-03	0,49	2,18	0,49	7	23,20	
TI-01	0,49	2,18	0,49	28	24,30	29,1
TI-02	0,49	2,18	0,49	28	30,50	
TI-03	0,49	2,18	0,49	28	32,40	
TI-01	0,49	2,18	0,49	63	33,60	37,4
TI-02	0,49	2,18	0,49	63	37,60	
TI-03	0,49	2,18	0,49	63	40,90	
TI-RCC-01	0,49	5,63	0,53	7	30,20	31,4
TI-RCC-02	0,49	5,63	0,53	7	31,10	
TI-RCC-03	0,49	5,63	0,53	7	32,80	
TI-RCC-01	0,49	5,63	0,53	28	26,00	35,1
TI-RCC-02	0,49	5,63	0,53	28	38,70	
TI-RCC-03	0,49	5,63	0,53	28	40,60	
TI-RCC-01	0,49	5,63	0,53	63	40,10	43,7
TI-RCC-02	0,49	5,63	0,53	63	43,90	
TI-RCC-03	0,49	5,63	0,53	63	47,10	
TI-RCT-01	0,49	8,37	0,55	7	20,40	21,5
TI-RCT-02	0,49	8,37	0,55	7	21,90	
TI-RCT-03	0,49	8,37	0,55	7	22,20	
TI-RCT-01	0,49	8,37	0,55	28	29,50	30,4
TI-RCT-02	0,49	8,37	0,55	28	29,80	
TI-RCT-03	0,49	8,37	0,55	28	31,80	
TI-RCT-01	0,49	8,37	0,55	63	26,40	28,2
TI-RCT-02	0,49	8,37	0,55	63	28,80	
TI-RCT-03	0,49	8,37	0,55	63	29,30	

Continuação

Traço	A/C	AG ABS(%)	ACF	ID	FC(MPa)	FC Média (MPa)
TP-01	0,60	2,18	0,60	7	16,50	17,9
TP-02	0,60	2,18	0,60	7	17,00	
TP-03	0,60	2,18	0,60	7	20,10	
TP-01	0,60	2,18	0,60	28	24,80	26,6
TP-02	0,60	2,18	0,60	28	25,50	
TP-03	0,60	2,18	0,60	28	29,40	
TP-01	0,60	2,18	0,60	63	29,10	31,1
TP-02	0,60	2,18	0,60	63	31,60	
TP-03	0,60	2,18	0,60	63	32,60	
TP-RCC-01	0,60	5,63	0,62	7	23,60	24,7
TP-RCC-02	0,60	5,63	0,62	7	24,20	
TP-RCC-03	0,60	5,63	0,62	7	26,20	
TP-RCC-01	0,60	5,63	0,62	28	24,40	28,8
TP-RCC-02	0,60	5,63	0,62	28	30,50	
TP-RCC-03	0,60	5,63	0,62	28	31,50	
TP-RCC-01	0,60	5,63	0,62	63	29,50	32,3
TP-RCC-02	0,60	5,63	0,62	63	33,50	
TP-RCC-03	0,60	5,63	0,62	63	33,90	
TP-RCT-01	0,60	8,37	0,64	7	19,20	20,1
TP-RCT-02	0,60	8,37	0,64	7	20,00	
TP-RCT-03	0,60	8,37	0,64	7	21,10	
TP-RCT-01	0,60	8,37	0,64	28	22,00	23,9
TP-RCT-02	0,60	8,37	0,64	28	23,80	
TP-RCT-03	0,60	8,37	0,64	28	25,90	
TP-RCT-01	0,60	8,37	0,64	63	23,50	25,6
TP-RCT-02	0,60	8,37	0,64	63	25,70	
TP-RCT-03	0,60	8,37	0,64	63	27,60	

Tabela A2 - Resultados observados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos (MPa).

Traço	A/C	AG ABS(%)	ACF	FT (MPa)	FT Média (MPa)
TR-01	0,42	2,18	0,42	11,1	12,7
TR-02	0,42	2,18	0,42	13,4	
TR-03	0,42	2,18	0,42	13,6	
TR-RCC-01	0,42	5,63	0,45	10,5	12,9
TR-RCC-02	0,42	5,63	0,45	13,8	
TR-RCC-03	0,42	5,63	0,45	14,4	
TR-RCT-01	0,42	8,37	0,46	9,9	9,9
TR-RCT-02	0,42	8,37	0,46	9,7	
TR-RCT-03	0,42	8,37	0,46	10,2	
TI-01	0,49	2,18	0,49	8,4	10,1
TI-02	0,49	2,18	0,49	10,7	
TI-03	0,49	2,18	0,49	11,3	
TI-RCC-01	0,49	5,63	0,53	9,3	10,5
TI-RCC-02	0,49	5,63	0,53	10,5	
TI-RCC-03	0,49	5,63	0,53	11,8	
TI-RTC-01	0,49	8,37	0,55	7,7	8,4
TI-RTC-02	0,49	8,37	0,55	8,7	
TI-RTC-03	0,49	8,37	0,55	8,8	
TP-01	0,60	2,18	0,60	6,5	8,6
TP-02	0,60	2,18	0,60	9,0	
TP-03	0,60	2,18	0,60	10,4	
TP-RCC-01	0,60	5,63	0,62	9,0	9,2
TP-RCC-02	0,60	5,63	0,62	9,3	
TP-RCC-03	0,60	5,63	0,62	9,4	
TP-RCT-01	0,60	8,37	0,64	6,0	6,2
TP-RCT-02	0,60	8,37	0,64	6,3	
TP-RCT-03	0,60	8,37	0,64	6,4	

Tabela A3 – Resultados observados da porcentagem de absorção de água por capilaridade (g/cm²).

Traço	A/C	AG ABS(%)	ACF	ABH ₂ O (g/cm ²)	ABH ₂ O Média (g/cm ²)
TR-01	0,42	2,18	0,42	0,70	0,70
TR-02	0,42	2,18	0,42	0,71	
TR-03	0,42	2,18	0,42	0,68	
TR-RCC-01	0,42	5,63	0,45	0,80	0,74
TR-RCC-02	0,42	5,63	0,45	0,70	
TR-RCC-03	0,42	5,63	0,45	0,73	
TR-RCT-01	0,42	8,37	0,46	0,71	0,71
TR-RCT-02	0,42	8,37	0,46	0,70	
TR-RCT-03	0,42	8,37	0,46	0,71	
TI-01	0,49	2,18	0,49	0,75	0,73
TI-02	0,49	2,18	0,49	0,72	
TI-03	0,49	2,18	0,49	0,71	
TI-RCC-01	0,49	5,63	0,53	0,64	0,64
TI-RCC-02	0,49	5,63	0,53	0,64	
TI-RCC-03	0,49	5,63	0,53	0,64	
TI-RCT-01	0,49	8,37	0,55	0,77	0,77
TI-RCT-02	0,49	8,37	0,55	0,76	
TI-RCT-03	0,49	8,37	0,55	0,77	
TP-01	0,60	2,18	0,60	0,74	0,76
TP-02	0,60	2,18	0,60	0,78	
TP-03	0,60	2,18	0,60	0,77	
TP-RCC-01	0,60	5,63	0,62	0,81	0,81
TP-RCC-02	0,60	5,63	0,62	0,82	
TP-RCC-03	0,60	5,63	0,62	0,81	
TP-RCT-01	0,60	8,37	0,64	0,81	0,80
TP-RCT-02	0,60	8,37	0,64	0,79	
TP-RCT-03	0,60	8,37	0,64	0,79	