

PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO E DE LONGA DURAÇÃO DE  
CONCRETOS DE RESISTÊNCIA NORMAL E ALTO DESEMPENHO CONTENDO  
AGREGADOS DE RESÍDUO DE CONCRETO DE DIFERENTES ORIGENS

Mayara Amario

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção do  
título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Marco Pepe

Rio de Janeiro

Junho de 2019

PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO E DE LONGA DURAÇÃO DE  
CONCRETOS DE RESISTÊNCIA NORMAL E ALTO DESEMPENHO CONTENDO  
AGREGADOS DE RESÍDUO DE CONCRETO DE DIFERENTES ORIGENS

Mayara Amario

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D. Sc.

---

Dr. Marco Pepe, Ph.D.

---

Prof. Enzo Martinelli, Ph.D.

---

Prof. Oscar Aurelio Mendoza Reales, D. Sc.

---

Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2019

Amario, Mayara

Propriedades do estado fresco e de longa duração de concretos de resistência normal e alto desempenho contendo agregados de resíduo de concreto de diferentes origens/ Mayara Amario. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XXII, 206 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Marco Pepe

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 191-206.

1. RCD 2. RCA 3. Dosagem científica 4. Reologia  
5. Comportamento de longa duração I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Dedico esse trabalho aos meus queridos pais,*

*Magda e Mayer.*

## AGRADECIMENTOS

Mais uma importante etapa concluída. Muitas pessoas foram fundamentais para a realização desse trabalho. Sem elas, esses quatro anos não teriam o mesmo significado para mim.

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo.

Agradeço ao meu professor e orientador Romildo por ser fundamental para que esse trabalho acontecesse. Já são quase dez anos sob sua orientação, jamais poderia imaginar que a orientação que começou lá na graduação seguiria até os dias de hoje, sempre se fortalecendo e amadurecendo. Muito do que eu sou hoje, eu sou graças a você! Obrigada por sempre confiar na minha capacidade, por me orientar, me incentivar e, principalmente, por tornar tudo isso possível. Agradeço também ao meu coorientador Marco Pepe por participar intensamente desse trabalho. Suas contribuições, que já vem desde o mestrado, foram muito importantes para a conclusão desse estudo. Obrigada por propor novas ideias e incentivar os debates sobre a reciclagem de resíduos, sempre visando ampliar o conhecimento sobre o assunto.

Aos membros da banca examinadora, Enzo, Paulo Roberto e Oscar, por valorizarem a importância desse estudo, por reconhecerem meu esforço e dedicação e por todas as respeitáveis contribuições dadas ao meu trabalho.

Agradeço aos meus pais, Magda e Mayer, por todo amor, carinho e apoio durante toda a minha vida, por abrirem mão de muitas coisas para permitirem eu fosse quem eu sou hoje e por acreditarem mais em mim do que eu mesma. É impossível descrever em palavras a importância que vocês têm na minha vida. Nada seria possível sem vocês ao meu lado. Amo muito vocês! Agradeço também à minha irmã Michelle por ser essa pessoa tão especial e por sempre acreditar em mim. Você também é o meu orgulho! Aos meus familiares, em especial à minha avó Íris, sempre muito carinhosa e atenciosa, que esteve feliz com cada conquista minha. Infelizmente, você não está mais entre nós para compartilhar mais esse momento.

Não poderia deixar de agradecer a minha querida e eterna dupla, companheira de todas as horas, de todos os momentos, a irmã que a vida me deu. Carol, você nem imagina o quanto você é importante para mim, a nossa amizade vai muito além desse estudo. Obrigada por compartilhar histórias, por me fortalecer e por não só apoiar as minhas ideias, como também por acreditar e segui-las junto comigo. Ainda bem que a Engenharia Civil te trouxe para a minha vida! Agradeço também à Ana, ao Marcus e à Erica por terem se tornado a minha segunda família, sempre preocupados e muito carinhosos comigo, que nunca duvidaram da minha capacidade.

Agradeço aos meus inseparáveis amigos João Gabriel, André e Cairo por serem os melhores que eu poderia ter, por me apoiarem, incentivarem e por dividirem comigo vários momentos incríveis ao longo desses quatro anos. Agradeço também às minhas queridas amigas Adriana e Fernanda por compreenderem minhas ausências nesses últimos meses, por sempre me incentivarem e apoiarem em minhas decisões, por serem exatamente o que eu preciso nos momentos mais difíceis.

Aos amigos que fiz aqui no NUMATS desde o mestrado e que seguiram durante todo o doutorado. Em especial à Vivian, sempre muito preocupada e disposta a dar conselhos sobre o andamento desse trabalho, também foi muito compreensiva nos momentos finais dessa tese. Agradeço também à Tamara, minha companheira de sala, por compartilhar tanto os momentos de alegria quanto os de dificuldade, tornando os dias mais leves e agradáveis. Ao Thiago e ao Fabrício por todas as conversas, almoços e risadas ao longo desses quatro anos. Agradeço também ao grupo da biomassa, Yassin, Vanessa e Dani, pela amizade e por estarem sempre presentes e dispostos a me ajudar em todos os momentos. Aos meus queridos ICs, Ana e Gabriel, que sempre estiveram muito animados e felizes, principalmente com a parte inicial dessa pesquisa, e que se tornaram amigos para a vida toda. Vocês fizeram parte disso!

Agradeço a todos os técnicos do NUMATS e LABEST, que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial, ao Adailton e Marcelo que acompanharam todas as etapas deste estudo, desde as etapas de processamento dos resíduos até os cansativos carregamentos de fluência. A boa vontade em ajudar e o bom humor de vocês foram fundamentais para tornar esse trabalho menos

estressante. Aos também sempre presentes, Alessandro, Alex, Anderson, Flávio, Helder, Hidekel, Kleber, Márcio e Mauro.

Aos funcionários do NUMATS e LABEST, em especial à Luzidelle que sempre esteve disposta a me ajudar, em todos os momentos em que eu precisei.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Civil, da COPPE/UFRJ, em especial à Marcia, por todo carinho e paciência demonstrados comigo, principalmente nos momentos finais desse trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO E DE LONGA DURAÇÃO DE  
CONCRETOS DE RESISTÊNCIA NORMAL E ALTO DESEMPENHO CONTENDO  
AGREGADOS DE RESÍDUO DE CONCRETO DE DIFERENTES ORIGENS

Mayara Amario

Junho/2019

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Marco Pepe

Programa: Engenharia Civil

A principal diferença do agregado reciclado, em comparação aos naturais, é a sua maior porosidade e, conseqüentemente, absorção de água, o que requer um acréscimo na água de mistura na dosagem dos concretos, para garantir adequada trabalhabilidade. Muitos estudos têm sido desenvolvidos para investigar a influência da utilização de agregados reciclados nas propriedades mecânicas do concreto, porém o conhecimento sobre os efeitos dos agregados reciclados de concreto (ARCs) nas principais deformações do concreto ainda é bem restrito. Neste sentido, este estudo visa avaliar como as propriedades físicas de ARCs de diferentes origens podem influenciar nas propriedades do estado fresco (reologia e hidratação) e de longa duração (fluência e retração) de concretos reciclados de resistência normal e alto desempenho e comparar os resultados obtidos com modelos de previsão da literatura. Os agregados reciclados de diferentes origens foram processados em escala industrial e as misturas foram dosadas de acordo com os conceitos de dosagem científica para a otimização da mistura granular, através do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC). Os resultados mostraram que o método de dosagem escolhido foi primordial para que a origem e a fração granulométrica dos agregados reciclados não provocassem mudanças significativas nas propriedades dos concretos. Além disso, o teor de argamassa aderida aos agregados e, conseqüentemente, o volume total de argamassa das misturas foram parâmetros-chave para a definição de diferentes propriedades dos concretos reciclados.



Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

FRESH PROPERTIES AND LONG-TERM DEFORMATION OF NORMAL AND  
HIGH PERFORMANCE CONCRETE CONTAINING RECYCLED CONCRETE  
AGGREGATES OF DIFFERENT SOURCES

Mayara Amario

June/2019

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho

Marco Pepe

Department: Civil Engineering

The main difference between recycled and natural aggregates is the higher porosity and, consequently, water absorption of recycled aggregates which it requires an increase in the mixing water in the mix-design of concretes, to assurance suitable workability. Many studies have been developed to investigate the influence of the use of recycled aggregates on the mechanical properties of concrete, but the knowledge about the effects of recycled concrete aggregates (RCAs) on the main concrete deformations is still very limited. In this context, this study aims to evaluate how the physical properties of RCAs of different sources influence the fresh state (rheology and hydration process) and long-term properties (creep and shrinkage) of normal and high performance recycled concrete and compare these results with prediction models of the literature. The recycled aggregates of different sources were processed on an industrial scale and the mixtures were composed according to the scientific mix-design concepts for the optimization of the granular mixture, through the Compressible Packing Model (CPM). The results showed that the use of CPM was essential to avoid significant changes in concrete properties due to source and the size fraction of the recycled concrete aggregates. In addition, the attached mortar content and, consequently, the total mortar volume of the mixtures were key-parameters for the definition of different properties of the recycled aggregate concrete.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XX</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA DO TEXTO.....	4
<b>CAPÍTULO 2. PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO – ARCS.....</b>	<b>7</b>
2.1. REVISÃO DA LITERATURA .....	7
2.1.1. <i>Resíduos de Construção e Demolição – Definição, composição e reciclagem.....</i>	<i>7</i>
2.1.2. <i>Agregado de Resíduo de Concreto.....</i>	<i>9</i>
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	10
2.2.1. <i>Origem dos resíduos de concreto.....</i>	<i>11</i>
2.2.2. <i>Metodologia de produção do resíduo do laboratório (RCA_L) .....</i>	<i>12</i>
2.2.3. <i>Metodologia de produção dos agregados reciclados .....</i>	<i>14</i>
2.2.4. <i>Agregados graúdos naturais e reciclados.....</i>	<i>18</i>
2.2.5. <i>Métodos de ensaios dos agregados.....</i>	<i>18</i>
2.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	23
2.3.1. <i>Levantamento da quantidade de agregados reciclados após o processamento, de acordo com a origem do resíduo .....</i>	<i>23</i>
2.3.2. <i>Propriedades dos agregados de resíduo de concreto e parâmetros de controle de qualidade .....</i>	<i>24</i>
2.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	36

## **CAPÍTULO 3. DOSAGEM E COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE CONCRETOS RECICLADOS ..... 38**

3.1. REVISÃO DA LITERATURA .....	38
3.1.1. <i>Métodos de dosagem para concretos reciclados</i> .....	38
3.1.2. <i>Principais propriedades de concretos reciclados</i> .....	41
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	43
3.2.1. <i>Caracterização dos materiais</i> .....	43
3.2.2. <i>Dosagem e composição das misturas</i> .....	47
3.2.3. <i>Produção, moldagem e cura dos concretos</i> .....	56
3.2.4. <i>Métodos de ensaios em concretos</i> .....	57
3.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	58
3.3.1. <i>Abatimento de tronco de cone</i> .....	59
3.3.2. <i>Propriedades mecânicas - Resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral</i> .....	59
3.3.3. <i>Absorção total de água, índice de vazios e massa específica</i> .....	64
3.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	68

## **CAPÍTULO 4. REOLOGIA NO ESTADO FRESCO DE CONCRETOS RECICLADOS 69**

4.1. REVISÃO DA LITERATURA .....	69
4.2. PARTE A: VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NA REOLOGIA .....	74
4.2.1. <i>Materiais e métodos</i> .....	75
4.2.2. <i>Apresentação e análise dos resultados</i> .....	78
4.3. PARTE B: VERIFICAÇÃO EM CONCRETOS RECICLADOS .....	86
4.3.1. <i>Materiais e métodos</i> .....	86
4.3.2. <i>Apresentação e análise dos resultados</i> .....	87
4.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	90

## **CAPÍTULO 5. PROCESSO DE HIDRATAÇÃO EM CONCRETOS RECICLADOS 92**

5.1. REVISÃO DA LITERATURA .....	92
5.1.1. <i>Hidratação do cimento Portland</i> .....	92
5.1.2. <i>Processo de hidratação em concretos</i> .....	94
5.1.3. <i>Hidratação em concretos reciclados</i> .....	99
5.2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	100
5.2.1. <i>Caracterização dos materiais</i> .....	101
5.2.2. <i>Dosagem e composição das misturas</i> .....	101
5.2.3. <i>Método de ensaio – Elevação adiabática de temperatura</i> .....	101
5.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	103
5.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	110

## **CAPÍTULO 6. RETRAÇÃO AUTÓGENA E RETRAÇÃO POR SECAGEM EM CONCRETOS RECICLADOS ..... 113**

6.1. REVISÃO DA LITERATURA .....	113
6.1.1. <i>Retração autógena em concretos</i> .....	113
6.1.2. <i>Retração por secagem em concretos</i> .....	115
6.1.3. <i>Retração total em concretos</i> .....	118
6.1.4. <i>Modelos de previsão da retração em concretos</i> .....	119
6.2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	132
6.2.1. <i>Caracterização dos materiais</i> .....	132
6.2.2. <i>Dosagem e composição das misturas</i> .....	132
6.2.3. <i>Métodos de ensaio</i> .....	132
6.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	136
6.3.1. <i>Retração autógena</i> .....	136
6.3.2. <i>Retração por secagem</i> .....	141
6.3.3. <i>Retração total</i> .....	145

6.3.4. Modelos de previsão de retração em concretos.....	148
6.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	153
<b>CAPÍTULO 7. FLUÊNCIA EM CONCRETOS RECICLADOS .....</b>	<b>156</b>
7.1. REVISÃO DA LITERATURA .....	156
7.1.1. Definições e estudos anteriores .....	156
7.1.2. Modelos de previsão .....	158
7.2. PARTE A: DESENVOLVIMENTO DA HIDRATAÇÃO NOS CONCRETOS .....	165
7.2.1. Materiais e métodos .....	165
7.2.2. Apresentação e análise dos resultados .....	167
7.3. PARTE B: FLUÊNCIA NA COMPRESSÃO EM CONCRETOS .....	168
7.3.1. Materiais e métodos .....	169
7.3.2. Apresentação e análise dos resultados .....	172
7.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	183
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS      185</b>	
8.1. CONCLUSÕES .....	185
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	189
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>191</b>

## ***LISTA DE FIGURAS***

Figura 2.1 – Resíduos de concreto utilizados: (a) RCA_L; (b) RCA_C; (c) RCA_D ...	12
Figura 2.2 – Etapas da produção do resíduo RCA_L: (a) Corpos de prova do concreto de origem; (b) Concreto fragmentado após ruptura.....	13
Figura 2.3 – Britador de mandíbulas móvel QUEIXADA 200: (a) equipamento; (b) saída da fração fina.....	14
Figura 2.4 – Fração grossa dos resíduos após a britagem: (a) RCA_L; (b) RCA_C; (c) RCA_D.....	15
Figura 2.5 – Etapas do peneiramento: (a) posicionamento da big bag na parte superior do peneirador; (b) detalhe de uma das peneiras utilizadas; (c) saída de uma fração do material após o peneiramento .....	15
Figura 2.6 – Pilha de homogeneização: (a) RCA_L_B0; (b) RCA_L_B1; (c) RCA_C_B0; (d) RCA_C_B1; (e) RCA_D_B0; (f) RCA_D_B1 .....	17
Figura 2.7 – Amostra dos agregados graúdos: (a) Nat_B0; (b) RCA_L_B0; (c) RCA_C_B0; (d) RCA_D_B0; (e) Nat_B1; (f) RCA_L_B1; (g) RCA_C_B1; (h) RCA_D_B1 .....	18
Figura 2.8 – Etapas do ensaio de abrasão “Los Angeles”: (a) amostra de material antes do ensaio; (b) amostra de material após o ensaio .....	20
Figura 2.9 – Teor de argamassa aderida – Método do choque térmico: (a) forno utilizado para manter o material à 600°C; (b) colocação do material no forno; (c) detalhe do material após a fricção no pano; (d) amostra após a remoção da argamassa aderida.....	22
Figura 2.10 – Composição granulométrica dos agregados.....	25
Figura 2.11 – Resultados de massa específica dos agregados naturais e reciclados .....	26
Figura 2.12 – Resultados de absorção total dos agregados graúdos naturais e reciclados .....	26
Figura 2.13 – Correlação entre os valores de massa específica e absorção total de água dos agregados graúdos.....	27

Figura 2.14 – Resultados de teor de argamassa aderida para os agregados graúdos naturais e reciclados.....	28
Figura 2.15 – Correlação entre os valores de massa específica e teor de argamassa aderida dos agregados.....	29
Figura 2.16 – Correlação entre os valores de absorção total de água e teor de argamassa aderida dos agregados.....	29
Figura 2.17 – Classificação proposta para agregados graúdos .....	30
Figura 2.18 – Resultados de perda por abrasão “Los Angeles” dos agregados graúdos naturais e reciclados desse estudo .....	31
Figura 2.19 – Relação da perda por abrasão e do teor de argamassa aderida aos grãos	32
Figura 2.20 – Curvas de absorção de água em função do tempo para os agregados reciclados.....	33
Figura 2.21 – Índice de forma pelo método do paquímetro para todos os agregados graúdos .....	33
Figura 2.22 – Angularidade obtida através do ensaio de AIMS para todos os agregados graúdos .....	34
Figura 2.23 – Textura dos agregados graúdos obtidas através do ensaio de AIMS .....	35
Figura 2.24 – Esfericidade dos agregados graúdos obtidos através do ensaio de AIMS	36
Figura 3.1 – Composição granulométrica do agregado miúdo natural.....	44
Figura 3.2 – Granulometria do cimento Portland CPV-ARI.....	45
Figura 3.3 – Curva de compatibilidade do aditivo superplastificante MC Powerflow 1180 com o cimento CPV-ARI .....	47
Figura 3.4 – Etapas do ensaio de compactação mecânica e vibração: (a) colocação do material no molde; (b) posição do pistão antes da vibração; (c) posição do pistão após a vibração; (d) leitura da posição do pistão, através do catetômetro.....	49
Figura 3.5 – Etapas do ensaio de demanda d’água: (a) estado seco; (b) estado pendular; (c) estado funicular; (d) estado capilar .....	51
Figura 3.6 – Curvas típicas de tensão <i>versus</i> deformação axial aos 28 dias para os concretos: (a) classe C35 e (b) classe C60 .....	60

Figura 3.7 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos de resistência normal e de alta resistência.....	61
Figura 3.8 – Valores de deformação de pico do ensaio de resistência à compressão dos concretos de resistência normal e de alta resistência.....	62
Figura 3.9 – Resultados de módulo de elasticidade dos concretos de resistência normal e de alta resistência.....	63
Figura 3.10 – Resultados de tração por compressão diametral dos concretos de resistência normal e de alta resistência.....	64
Figura 3.11 – Resultados de absorção total de água para os concretos de resistência normal e de alta resistência.....	65
Figura 3.12 – Relação entre absorção total de água e volume total de argamassa dos concretos: (a) classe C35 e (b) classe C60 .....	66
Figura 3.13 – Relação entre índice de vazios e volume total de argamassa dos concretos: (a) classe C35 e (b) classe C60.....	67
Figura 3.14 – Relação entre massa específica e volume total de argamassa dos concretos: (a) classe C35 e (b) classe C60 .....	67
Figura 4.1 – Reômetro BTRHEOM: (a) detalhe do equipamento; (b) ensaio em uma amostra de concreto .....	78
Figura 4.2 – Resultados experimentais do torque em função da velocidade rotacional: (a) $a/c = 0,4$ ; (b) $a/c = 0,5$ e (c) $a/c = 0,6$ .....	79
Figura 4.3 – Relação entre a tensão de escoamento e a viscosidade plástica das misturas da parte A do estudo de reologia .....	82
Figura 4.4 – Relação entre a tensão de escoamento e o teor de substituição dos agregados graúdos nos concretos .....	83
Figura 4.5 – Relação entre a viscosidade plástica e o teor de substituição dos agregados graúdos nos concretos.....	83
Figura 4.6 – Evolução do abatimento de tronco de cone ao longo do tempo, em valores relativos .....	84



Figura 4.7 – Relação entre abatimento de tronco de cone e tensão de escoamento para os dados experimentais desse estudo e para as correlações propostas por HU <i>et al.</i> (1996) e FERRARIS & DE LARRARD (1998).....	85
Figura 4.8 - Resultados experimentais do torque em função da velocidade rotacional para os concretos das classes: (a) C35 e (b) C60.....	87
Figura 4.9 – Relação entre a tensão de escoamento e a viscosidade plástica de todas as misturas, tanto da parte A quanto da parte B do estudo de reologia .....	89
Figura 4.10 – Relação entre abatimento de tronco de cone e tensão de escoamento de todas as misturas do estudo de reologia.....	90
Figura 5.1 – Fases do processo de hidratação do cimento (FARIA, 2004).....	94
Figura 5.2 – Calorímetros adiabáticos de temperatura .....	101
Figura 5.3 – Curvas de elevação adiabática de temperaturas de todos os concretos das duas classes de resistência .....	103
Figura 5.4 – Relação entre os valores de elevação adiabática de temperatura e o consumo de cimento para todos os concretos.....	104
Figura 5.5 – Comparativo entre os coeficientes de elevação adiabática dos concretos	105
Figura 5.6 – Curvas normalizadas de elevação adiabática de temperatura dos concretos para as duas classes de resistência.....	106
Figura 5.7 – Relação entre os resultados de elevação adiabática de temperatura experimentais e os valores previstos pelo modelo de WALLER (1999) .....	108
Figura 5.8 – Ajuste do modelo de WALLER (1999) para os resultados experimentais desse estudo .....	109
Figura 5.9 – Grau de hidratação do cimento no tempo de todos os concretos .....	110
Figura 6.1 – Procedimentos para ensaio de retração autóloga em concretos: (a) moldes prismáticos; (b) colocação do concreto nos moldes em duas camadas; (c) leitura vertical em relógio comparador e (d) pesagem da amostra para verificação da constância de massa .....	134
Figura 6.2 – Amostras para ensaio de retração por secagem após a cura de 28 dias ...	135

Figura 6.3 – Curvas médias de retração autógena nos primeiros seis dias de idade dos concretos das classes: (a) C35 e (b) C60 .....	137
Figura 6.4 – Curvas médias de retração autógena após 350 dias de ensaio para os concretos das classes: (a) C35 e (b) C60 .....	138
Figura 6.5 – Relação entre a retração autógena ao final do ensaio e o volume total de argamassa para todos os concretos desse estudo .....	140
Figura 6.6 – Relação entre a retração autógena ao final do ensaio e o índice de vazios para todos os concretos desse estudo.....	140
Figura 6.7 – Curvas médias de retração por secagem após 350 dias de ensaio para os concretos das classes: (a) C35 e (b) C60 .....	141
Figura 6.8 – Perda de massa durante o ensaio de retração por secagem dos concretos das classes: (a) C35 e (b) C60.....	143
Figura 6.9 – Relação entre a retração por secagem ao final do ensaio e o volume total de argamassa para todos os concretos desse estudo .....	144
Figura 6.10 – Relação entre a retração por secagem ao final do ensaio e o índice de vazios para os concretos desse estudo .....	145
Figura 6.11 – Retração total dos concretos após 350 dias de ensaio: (a) classe C35 e (b) classe C60.....	146
Figura 6.12 – Comparativo entre os valores máximos de retração autógena, retração por secagem e retração total dos concretos.....	147
Figura 6.13 – Curvas experimentais e curvas previstas pelos modelos FIB Model Code (2010) e Eurocode (2004) para retração autógena dos concretos: (a) Classe C35 e (b) Classe C60 .....	149
Figura 6.14 – Curvas experimentais e curvas previstas pelos modelos FIB Model Code (2010) e Eurocode (2004) para retração por secagem dos concretos: (a) Classe C35 e (b) Classe C60.....	150
Figura 6.15 – Curvas experimentais e curvas previstas pelos modelos BAZANT-BAWEJA B3 (1995), CEP-FIP 90 (1990), GL2000 (2001) e ACI 209R-08 (2008) para retração total dos concretos: (a) Classe C35 e (b) Classe C60.....	152

Figura 6.16 – Comparativo entre os valores experimentais de retração total (autógena + secagem) ao final do ensaio e a previsão dos modelos disponíveis na literatura .....	153
Figura 7.1 – Curvas de elevação adiabática de temperatura para os concretos naturais e reciclados do estudo de fluência.....	167
Figura 7.2 – Grau de hidratação normalizado em função do tempo para todas as misturas dessa parte do estudo .....	168
Figura 7.3 – Detalhe do ensaio de fluência na compressão em uma das misturas desse estudo.....	171
Figura 7.4 – Deformações de fluência durante e após o carregamento (ABNT NBR 8224, 2012).....	172
Figura 7.5 – Fluência básica na compressão para os concretos de resistência normal carregados com baixo grau de hidratação: (a) com fase elástica e (b) sem fase elástica .....	174
Figura 7.6 – Fluência básica na compressão para os concretos de alta resistência carregados com baixo grau de hidratação: (a) com fase elástica e (b) sem fase elástica .....	174
Figura 7.7 – Fluência básica na compressão para os concretos de resistência normal carregados com alto grau de hidratação: (a) com fase elástica e (b) sem fase elástica	177
Figura 7.8 – Fluência básica na compressão para os concretos de alta resistência carregados com alto grau de hidratação: (a) com fase elástica e (b) sem fase elástica	177
Figura 7.9 – Comparação entre as curvas de deformação elástica + fluência básica no tempo e as curvas previstas pelos modelos de previsão da literatura: (a) C35-NAT-0,2; (b) C35-D-B1-0,2; (c) C60-NAT-0,2 e (d) C60-D-B1-0,2.....	179
Figura 7.10 – Comparação entre as curvas de deformação elástica + fluência básica no tempo e as curvas previstas pelos modelos de previsão da literatura: (a) C35-NAT-1,0; (b) C35-D-B1-1,0; (c) C60-NAT-1,0 e (d) C60-D-B1-1,0.....	181
Figura 7.11 – Comparação entre a deformação específica experimental aos 90 dias e a calculada pelos modelos: (a) FIB MODEL CODE (2010), (b) BAZANT-BAWEJA B3 (1995), (c) CEB-FIP 90 (1990), (d) GL 2000 (2001) e (e) ACI 209R-08 (2008).....	182

## ***LISTA DE TABELAS***

Tabela 2.1 – Origem de cada um dos resíduos .....	11
Tabela 2.2 – Composição do concreto de origem RCA_L.....	13
Tabela 2.3 – Tamanho dos grãos analisados no AIMS .....	21
Tabela 2.4 – Levantamento das quantidades de cada fração granulométrica produzida	24
Tabela 3.1 – Propriedades físicas do agregado miúdo .....	44
Tabela 3.2 – Propriedades do cimento Portland CPV-ARI.....	45
Tabela 3.3 – Propriedades do aditivo superplastificante MC Powerflow 1180 .....	46
Tabela 3.4 – Tamanho dos grãos de cada classe para ensaio de compacidade experimental .....	50
Tabela 3.5 – Valores de compacidade experimental dos agregados .....	50
Tabela 3.6 – Calibração dos parâmetros “p” e “q” .....	53
Tabela 3.7 – Composição das misturas de concreto.....	55
Tabela 3.8 – Dados adicionais da composição das misturas .....	56
Tabela 3.9 – Resultados de abatimento de tronco de cone para os concretos .....	59
Tabela 4.1 – Composição das misturas da primeira parte do estudo de reologia no estado fresco .....	76
Tabela 4.2 – Dados adicionais sobre a composição das misturas da parte A do estudo de reologia no estado fresco .....	76
Tabela 4.3 – Propriedades no estado fresco e resistência à compressão das misturas da primeira parte do estudo de reologia (fator a/c = 0,4) .....	80
Tabela 4.4 – Propriedades no estado fresco e resistência à compressão das misturas da primeira parte do estudo de reologia (fator a/c = 0,5) .....	81
Tabela 4.5 – Propriedades no estado fresco e resistência à compressão das misturas da primeira parte do estudo de reologia (fator a/c = 0,6) .....	81

Tabela 4.6 – Propriedades no estado fresco e resistência à compressão dos concretos da segunda parte do estudo de reologia (classes de resistência C35 e C60) .....	88
Tabela 5.1 – Capacidade térmica de cada constituinte do concreto (De Larrard, 1999) 96	
Tabela 5.2 – Resultados experimentais do ensaio de elevação adiabática de temperatura dos concretos analisados.....	104
Tabela 5.3 – Capacidade térmica, grau de hidratação final do cimento, calor de hidratação do concreto e elevação adiabática máxima prevista pelo modelo proposto por WALLER (1999) para todos os concretos .....	107
Tabela 6.1 – Valores para o coeficiente $\alpha_{as}$ do modelo FIB MODEL CODE (2010)..	120
Tabela 6.2 - Valores para o coeficiente $\alpha_{ds1}$ e $\alpha_{ds2}$ do modelo FIB MODEL CODE (2010) .....	121
Tabela 6.3 – Valores do coeficiente $k_h$ de acordo com EUROCODE (2004).....	123
Tabela 6.4 – Valores nominais de retração por secagem para concretos com cimento CEM Class N, de acordo com o EUROCODE (2004) .....	123
Tabela 6.5 – Valores de $\alpha_1$ de acordo com o modelo BAZANT-BAWEJA B3 (1995)	125
Tabela 6.6 – Valores de $\alpha_2$ de acordo com o modelo BAZANT-BAWEJA B3 (1995)	125
Tabela 6.7 – Equações para cálculo de $k_h$ do modelo BAZANT-BAWEJA B3 (1995) .....	125
Tabela 6.8 – Coeficiente $\beta_{sc}$ de acordo com o tipo de cimento pelo modelo CEP-FIP 90 (1990) .....	126
Tabela 6.9 – Resumo dos fatores que são considerados para a previsão dos modelos apresentados nesse capítulo .....	130
Tabela 6.10 – Resultados obtidos através do ensaio de retração autógena para os concretos das duas classes de resistência .....	139
Tabela 6.11 – Retração por secagem e perda de massa ao final do ensaio para todos os concretos desse estudo.....	144
Tabela 7.1 – Dados do ensaio de elevação adiabática de temperatura para os concretos dessa parte do estudo .....	168

Tabela 7.2 – Nova nomenclatura das misturas, grau de hidratação normalizado e grau de hidratação do cimento definidos para o final da cura dos concretos do estudo de fluência .....	170
Tabela 7.3 – Tempo de cura térmica, resistência à compressão e carga aplicada no ensaio de fluência para todos os concretos .....	173
Tabela 7.4 – Módulo de elasticidade e fluência específica durante o carregamento e após o descarregamento para todos os concretos.....	175

# *Capítulo 1*

## *Introdução*

### *1.1. Motivação*

A industrialização e o crescimento dos grandes centros urbanos trazem a sociedade uma questão que não pode ser ignorada. No Brasil, são coletados cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição por ano. Esta situação é ainda mais preocupante, dado que a quantidade total desses resíduos deve ser ainda maior, pois neste cálculo são considerados apenas os resíduos coletados pelos municípios que são lançados ou abandonados nos logradouros públicos (ABRELPE, 2015). Durante o ano de 2014, foram produzidos 871 milhões de toneladas de resíduos da construção civil em toda a Europa (EUROSTAT, 2014), enquanto nos Estados Unidos foram produzidos 534 milhões de toneladas neste mesmo ano (EPA, 2014).

A indústria da construção é o setor com maior impacto ambiental, visto que consome grande quantidade de recursos naturais e energia e é grande geradora de resíduos. Considerando que o concreto é um dos materiais mais utilizados na construção devido à sua versatilidade e propriedades amplamente conhecidas, a sustentabilidade na indústria da construção deve ser empregada de forma a minimizar os impactos ambientais do uso deste material (KISKU *et al.*, 2017).

O concreto é um material constituído basicamente por cimento, água e agregados. Dentre estes materiais, os agregados representam cerca de 60-75% do volume total de concreto (BEHERA *et al.*, 2014). De acordo com SONAWANE & PIMPLIKAR (2013), o consumo global anual de agregados naturais em 2012 excedeu 26 bilhões de toneladas. Como o consumo de concreto na indústria está em amplo crescimento, acredita-se que a demanda por agregados deve dobrar nas próximas duas ou três décadas.

Neste contexto, a reciclagem de resíduos para serem utilizados como agregados para concretos é uma alternativa com grande potencial para minimizar o impacto ambiental

gerado tanto pela extração de recursos naturais, como pela diminuição de resíduos sem destinação adequada.

Muitos estudos têm sido realizados, nos últimos anos, para avaliar a possibilidade da aplicação de agregados reciclados de resíduos da construção civil como substitutos de agregados naturais em concretos (KISKU *et al.*, 2017). Porém, a maioria destes estudos visa compreender a influência desses agregados somente nas propriedades mecânicas de concretos reciclados. Ainda há muito a ser estudado para entender melhor como as propriedades intrínsecas dos agregados reciclados afetam, de fato, nas propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido.

Neste sentido, este estudo visa avaliar como as propriedades físicas de agregados reciclados de concreto (ARC) de diferentes origens podem influenciar nas propriedades do estado fresco (reologia e hidratação) e de longa duração (fluência e retração). Para isso, esse estudo foi dividido em três grandes etapas experimentais. Na primeira, foi realizado o processamento, em escala industrial, de aproximadamente 21 toneladas de resíduos de concreto de três fontes de origem distintas e uma extensa caracterização experimental das propriedades dos agregados graúdos reciclados produzidos. Na segunda, foram utilizados conceitos de dosagem científica para a otimização da mistura granular seca, através do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), de forma a compor diferentes traços para cada classe de resistência e para cada agregado reciclado, levando-se em consideração as propriedades das matérias primas utilizadas, e não apenas substituindo a fração de agregado natural por agregado reciclado. Além disso, nessa etapa foi realizada a caracterização inicial desses concretos, através de ensaios físicos e mecânicos. Por fim, na terceira e mais extensa etapa, as propriedades do estado fresco (reologia e hidratação) e as de longa duração (retração e fluência) foram avaliadas, relacionadas com propriedades físicas dos agregados reciclados e comparadas com modelos existentes na literatura.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo principal deste estudo é avaliar o comportamento no estado fresco e de longa duração de concretos reciclados de resistência normal e de alta resistência, relacionando as propriedades dos concretos reciclados às propriedades dos agregados reciclados. Serão analisadas as propriedades reológicas do estado fresco, o desenvolvimento da



hidratação e as deformações de longa duração (retração e fluência) para investigar se é possível produzir de forma eficiente concretos de resistência normal e de alto desempenho com agregados oriundos de resíduos de concreto.

Para atingir o objetivo principal, objetivos específicos foram definidos. O primeiro consistia em realizar o beneficiamento de três resíduos de origens diferentes e avaliar a eficiência do processamento através da quantificação de cada fração granulométrica produzida.

O segundo objetivo específico diz respeito à caracterização dos agregados reciclados com a obtenção de possíveis correlações entre algumas das propriedades desses agregados e o desenvolvimento da dosagem de concretos reciclados, através do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).

O terceiro objetivo específico é relacionado à avaliação das propriedades do estado fresco dos concretos reciclados. Para isso, foram realizados ensaios de reologia e de elevação adiabática de temperatura. A reologia foi dividida em duas partes: na primeira, foram avaliadas as principais variáveis envolvidas nessas propriedades; na segunda, os concretos reciclados desse estudo foram caracterizados segundo suas propriedades reológicas. Em ambas as partes, foram realizados ensaios de abatimento de tronco de cone e reômetro BTRHEOM.

O quarto objetivo específico é relacionado à análise das deformações de longa duração provocadas pelas reações de hidratação e pela secagem dos concretos reciclados. Para isso, foram realizados ensaios de retração autógena e retração por secagem por aproximadamente 1 ano. Para completar a análise, os resultados experimentais foram comparados com modelos de previsão da literatura.

O quinto e último objetivo específico refere-se à influência dos agregados reciclados nas deformações de longa duração sob carregamento constante de concretos com baixo e alto grau de hidratação. Para isso, as amostras de fluência foram curadas em banho térmico que acompanhava a rampa de elevação adiabática de temperatura e as amostras foram carregadas em duas idades distintas. Os resultados experimentais também foram comparados com os modelos de previsão existentes na literatura para complementar a análise de resultados.

### ***1.3. Estrutura do texto***

Essa tese de doutorado está dividida em oito capítulos:

**Capítulo 1: Introdução** – Nesse capítulo, é apresentada uma breve introdução sobre a importância da reciclagem de resíduos de construção e demolição e a viabilidade de sua utilização como agregados para concretos. Define ainda os objetivos e a estrutura do trabalho.

**Capítulo 2: Processamento e caracterização de agregados reciclados de concreto – ARCs** – Neste capítulo são apontadas as principais definições e as especificações de agregados reciclados no Brasil, juntamente com as principais propriedades de agregados reciclados, baseadas em resultados disponíveis em diferentes publicações. Após a revisão da literatura, são apresentadas as metodologias experimentais empregadas para o processamento e caracterização dos agregados reciclados de concreto de três diferentes origens. Por fim, são apresentados os resultados da extensa caracterização dos agregados graúdos reciclados e com base na análise desses resultados, é proposto um parâmetro-chave para o controle de qualidade dos agregados de resíduo de concreto.

**Capítulo 3: Dosagem e comportamento físico e mecânico de concretos reciclados** – Esse capítulo se inicia com uma revisão dos principais e mais recentes estudos disponíveis na literatura sobre a aplicação de agregados reciclados de resíduo de concreto em novos concretos, com ênfase no comportamento físico e mecânico. Além disso, é discutida a questão da eficiência dos métodos de dosagem tradicionais para aplicação em concretos reciclados. Durante o programa experimental apresentado nesse capítulo, são explicados o método de dosagem científica utilizado para definir a composição das misturas e a metodologia de compensação de água de absorção durante o processo de mistura. Por fim, são relatados os resultados experimentais da caracterização física e mecânica dos concretos produzidos e são propostas algumas correlações entre essas propriedades e as propriedades dos agregados. Os concretos desenvolvidos nesse capítulo ainda terão outras propriedades avaliadas nos próximos capítulos dessa tese, mostrando que o capítulo 3 representou uma base fundamental para o desenvolvimento desse estudo.

**Capítulo 4: Reologia no estado fresco de concretos reciclados** – Nesse capítulo é feita uma breve introdução aos principais aspectos que influenciam nas propriedades dos concretos reciclados no estado fresco. Ainda na revisão de literatura, são

apresentados os dois principais modelos de reologia e, na parte dos resultados, é discutido qual desses modelos melhor descreve o comportamento dos concretos desse estudo. O estudo de reologia foi dividido em duas partes: na primeira foram avaliadas as principais variáveis envolvidas nessa propriedade e propostas algumas correlações e na segunda, foi feita uma caracterização do comportamento reológico dos concretos do capítulo 3.

**Capítulo 5: Processo de hidratação em concretos reciclados** – Nesse capítulo são apresentados os resultados do estudo experimental de elevação adiabática de temperatura. Inicialmente, são discutidos os principais fatores que determinam a cinética das reações de hidratação do cimento e as possíveis consequências da aplicação de agregados de resíduo de concreto em novos concretos. Em seguida, é mostrada a metodologia experimental empregada para avaliação do desenvolvimento da hidratação nos concretos desse estudo. Por fim, juntamente com os resultados, é apresentada uma comparação com um modelo da literatura para o cálculo do grau de hidratação máximo do cimento e a elevação adiabática final prevista para cada uma das misturas desse capítulo.

**Capítulo 6: Retração autógena e retração por secagem em concretos reciclados** – Nesse capítulo são apresentados os resultados experimentais dos ensaios de retração autógena e retração por secagem nos mesmos concretos dosados no capítulo 3 e esses resultados são comparados com as curvas previstas por seis modelos de previsão existentes na literatura. Na revisão da literatura, são discutidos os principais fatores que influenciam nessas propriedades, tanto relacionados à pasta de cimento quanto aos agregados. Além disso, é introduzido o conceito de cura interna e é avaliada a possibilidade de sua ocorrência através da utilização de agregados reciclados.

**Capítulo 7: Fluência em concretos reciclados** – Nesse capítulo é apresentada uma introdução aos principais aspectos relacionados à fluência na compressão em concretos, de forma geral, e em concretos reciclados. São mostrados também alguns dos principais modelos de previsão existentes na literatura. Esse capítulo foi dividido em duas partes: na primeira, são apresentadas as curvas de elevação adiabática de temperatura que serviriam como rampa para a cura térmica das amostras que seriam submetidas ao ensaio de fluência; na segunda, são analisados os resultados dos ensaios de fluência para duas idades de carregamento e esses resultados são comparados com os valores previstos por modelos de previsão disponíveis na literatura.

**Capítulo 8: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros** – Por fim, o último capítulo dessa tese retoma as principais conclusões de cada capítulo e destaca a importância dessa pesquisa para a expansão do conhecimento a respeito da influência da aplicação de agregados reciclados em concretos, principalmente nas propriedades do estado fresco e nas de longa duração. São apresentadas também, sugestões para trabalhos futuros.

## *Capítulo 2*

# *Processamento e caracterização de agregados reciclados de concreto – ARCs*

### *2.1. Revisão da literatura*

Nessa seção, serão apresentadas a definição e a composição dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e a importância de sua reciclagem. Além disso, será apresentada uma das possíveis classificações do RCD, quanto a sua composição. Por fim, serão apresentados dados disponíveis na literatura sobre as principais propriedades dos agregados de resíduo de concreto (ARC).

#### *2.1.1. Resíduos de Construção e Demolição – Definição, composição e reciclagem*

A Resolução CONAMA 307/2002 define resíduo de construção e demolição como “todo o resíduo produzido durante as atividades de construção, demolição, reparo e reforma de obras da construção civil e os produzidos durante a preparação e escavação de terrenos”. Esse resíduo é composto por restos e fragmentos de tijolos cerâmicos, madeira, concreto, vidro, gesso, aço, plástico, papel, entre outros materiais que fazem parte de um edifício ou restos de embalagens utilizadas durante a execução da obra.

O Resíduo de Construção e Demolição (RCD) pode ser classificado de diferentes formas. Uma das classificações mais utilizadas é quanto à origem do material, ou seja, o resíduo pode ser proveniente de construção, demolição ou de construção e demolição. Em geral, o RCD é um resíduo misto, porém o grau de heterogeneidade depende, principalmente, da sua origem (LLATAS, 2013).

Existe um elevado potencial para a reciclagem de resíduos de construção e demolição na forma de agregado, visto que grande parte destes materiais é composta por concreto, argamassa e rochas (SHI *et al.*, 2016). Estudos mostraram que a quantidade de materiais inertes em relação à quantidade total de resíduos da construção civil representa

aproximadamente 58% em Portugal, 67% na Noruega, e 85% na Itália e na Espanha (PEREIRA *et al.* (2004), e BERGSDAL *et al.* (2007), COSTA e URSELLA (2003), e REIXACH *et al.* (2000)). Muitas são as vantagens da reciclagem de resíduos: conservação de áreas de preservação ambiental, aumento da vida útil de aterros, diminuição da poluição e de gastos de energia, redução do consumo de recursos naturais, reutilização de resíduos que seriam descartados em aterros e criação de empregos (ULUBEYLI *et al.*, 2017).

A contribuição da reciclagem de RCD se destaca quando comparada com os métodos tradicionais de tratamento. Estudos comprovaram que ao comparar três cenários diferentes (reciclagem, incineração e aterro), em termos de potencial de aquecimento global, a maneira mais ecológica de tratar o RCD é a reciclagem, seguido da incineração e o último é a disposição em aterro (ORTIZ *et al.* (2010) e MARZOUK & AZAB (2014)). Neste sentido, é fundamental o incentivo para o aumento da taxa de reciclagem de RCD no mundo.

Entretanto, alguns fatores devem ser levados em consideração para avaliar a viabilidade de instalação de uma usina de reciclagem. O principal deles está relacionado aos impactos ambientais provocados pelo funcionamento de uma usina, sendo o barulho e a poeira classificados como os principais problemas desta instalação (COELHO & DE BRITO, 2013). Por isso, as usinas de reciclagem devem ser instaladas distantes de centros comerciais e residenciais. Outro aspecto que deve ser considerado é o gasto com transporte do resíduo para a usina. Segundo MERCANTE *et al.* (2012), o transporte é a etapa do processo que mais provoca impactos ambientais. Portanto, a usina deve ser instalada o mais próximo possível das fontes geradoras e dos locais de uso do material reciclado.

No Brasil, a primeira usina de reciclagem de resíduos surgiu em 1986 (MIRANDA *et al.*, 2009), mas houve um aumento significativo na quantidade de usinas instaladas após a publicação da resolução CONAMA 307, em 2002, pois a partir deste ano, os geradores passaram a ser os responsáveis pelos resíduos produzidos. Segundo a pesquisa realizada pela ABRECON (2015), existem mais de 310 usinas no país, mas somente 105 usinas participaram da pesquisa. Foi constatado que cerca de 20% do RCD gerado no Brasil é reciclado em usinas. Porém, a falta de apoio do setor público (em relação ao consumo de materiais reciclados), a falta de fiscalização da triagem e destinação do RCD, a falta de conhecimento do mercado e a elevada tributação aplicada

ao setor podem ser considerados os aspectos negativos para a comercialização dos agregados reciclados.

Em relação a reciclagem de resíduos, as principais etapas do processamento incluem a britagem (primária e secundária), triagem, peneiramento e remoção de impurezas e materiais como plásticos, ferro e aço. A seleção de determinados equipamentos e suas configuração influenciam o tipo, a quantidade e a qualidade dos agregados reciclados, assim como a taxa de reciclagem da usina (HIETE, 2013). Além disso, o método de britagem utilizado tem grande influência na forma e na textura dos grãos deste agregado (GÜNEYISI *et al.*, 2014).

### **2.1.2. Agregado de Resíduo de Concreto**

A principal classificação adotada para agregados reciclados de RCD é a apresentada pela ABNT NBR 15116 (2004). Nela, os agregados são divididos da seguinte forma:

- ARC – Agregado de resíduo de concreto: Agregado composto por, no mínimo, 90% em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas.
- ARM – Agregado de resíduo misto: Agregado composto por menos de 90% em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas.

A principal diferença entre o ARC e o agregado natural é a presença de uma pasta de cimento envelhecida (argamassa aderida) na superfície dos agregados reciclados. Ela pode representar de 20 a 70% em massa do agregado reciclado (AKBARNEZHAD *et al.*, 2011). Geralmente, esta argamassa aderida apresenta maior porosidade e menor massa específica que os agregados naturais e está diretamente relacionada à qualidade do ARC (AL-BAYATI *et al.*, 2016). Além disso, o tamanho inicial do resíduo, a resistência do concreto de origem e o processo de trituração tem grande impacto na porcentagem de argamassa aderida ao ARC (SPAETH & TEGGUER, 2013). Estudos mostram que o teor de argamassa aderida diminui conforme o aumenta o diâmetro máximo do agregado (KISKU *et al.*, 2017).

As propriedades dos ARCs estão diretamente ligadas às características e quantidade de argamassa aderida nos grãos. Assim, os ARCs são caracterizados por uma absorção de água consideravelmente maior, conseqüentemente, apresentam massa específica menor, e propriedades mecânicas inferiores que agregados naturais (PEPE *et al.*, 2014). Estudos mostram que a absorção total de água dos ARCs pode variar entre 3 e 12%,

enquanto que os valores de absorção total de água dos agregados naturais variam entre 1 e 5% (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002). Devido à elevada porosidade da argamassa aderida, os ARCs apresentam grande perda por abrasão e facilidade para se partir em frações menores (AL-BAYATI *et al.*, 2016). Os valores de perda de massa por abrasão de agregados reciclados de resíduo de concreto podem variar entre 20 e 51%, enquanto nos agregados naturais esse valor varia entre 10 e 40% (VERIAN *et al.*, 2018). Além disso, o método de britagem utilizado tem grande influência na forma e na textura dos grãos deste agregado (GÜNEYISI *et al.*, 2014). Geralmente, os ARCs são porosos, ásperos e irregulares (AL-BAYATI *et al.*, 2016). Logo, a qualidade do resíduo de origem é de extrema importância para a determinação das propriedades dos agregados reciclados. Em um estudo realizado por KOU & POON (2015) foi avaliada a influência da qualidade do concreto de origem nas propriedades tanto dos agregados reciclados, como nas propriedades do concreto produzido com esses agregados. Para isso, foram utilizados agregados reciclados cuja resistência à compressão do concreto de origem variava entre 30 e 100 MPa. Eles concluíram que quanto maior a resistência do concreto de origem (melhor qualidade), menor será a porosidade da argamassa aderida e mais próximas serão as propriedades dos ARCs das características do agregado natural.

Nesse contexto, essa parte do estudo visa aplicar um protocolo de processamento de resíduos de concreto para a produção de agregados reciclados, de forma a identificar um parâmetro de controle de qualidade para a caracterização dos ARCs. Para isso, foi realizado um estudo de caso em escala piloto industrial com aproximadamente 6 a 7 toneladas de resíduos de concreto de três diferentes origens, totalizando cerca de 20 toneladas de resíduos.

## **2.2. *Materiais e métodos***

Nessa seção, são apresentados os resíduos de concreto utilizados no estudo e a metodologia empregada para o processamento desses resíduos até a sua transformação em agregados reciclados.

Para cada resíduo de concreto, foram produzidos agregados reciclados de quatro frações granulométricas: brita 1, brita 0, areia e finos. A massa total de cada fração granulométrica de cada resíduo foi medida, visando quantificar a proporção de produção



de cada uma das frações e as perdas envolvidas no processamento. Esses resultados serão apresentados no item 2.3.1.

Essa seção ainda apresenta os métodos de ensaios utilizados para caracterizar extensamente os agregados reciclados produzidos. Como o objeto de estudo dessa pesquisa são somente os agregados graúdos reciclados, somente os agregados nas frações brita 1 e brita 0 foram caracterizados. Através dessa caracterização, foi possível estabelecer um parâmetro de controle de qualidade para classificar os diferentes tipos de agregados reciclados de concreto.

### **2.2.1. Origem dos resíduos de concreto**

Nesta pesquisa, foram produzidos agregados reciclados de concreto de três diferentes fontes de origem. A Tabela 2.1 apresenta um resumo da origem de cada um desses resíduos.

A sigla escolhida para nomear os resíduos teve como base as iniciais de *Recycled Concrete Aggregate*, nome amplamente utilizado internacionalmente para designar os agregados de resíduos de concreto, seguido pelas iniciais L, C e D que referenciam a origem de cada resíduo, isto é, produzido em laboratório, resíduo de usina de concreto e resíduo de demolição, respectivamente. Estes resíduos são ilustrados na Figura 2.1.

**Tabela 2.1 – Origem de cada um dos resíduos**

<b>Nome do Resíduo</b>	<b>Origem</b>
<b>RCA_L</b>	Concreto produzido no laboratório
<b>RCA_C</b>	Resíduo de usina de concreto
<b>RCA_D</b>	Concreto de usina de reciclagem de resíduos de demolição

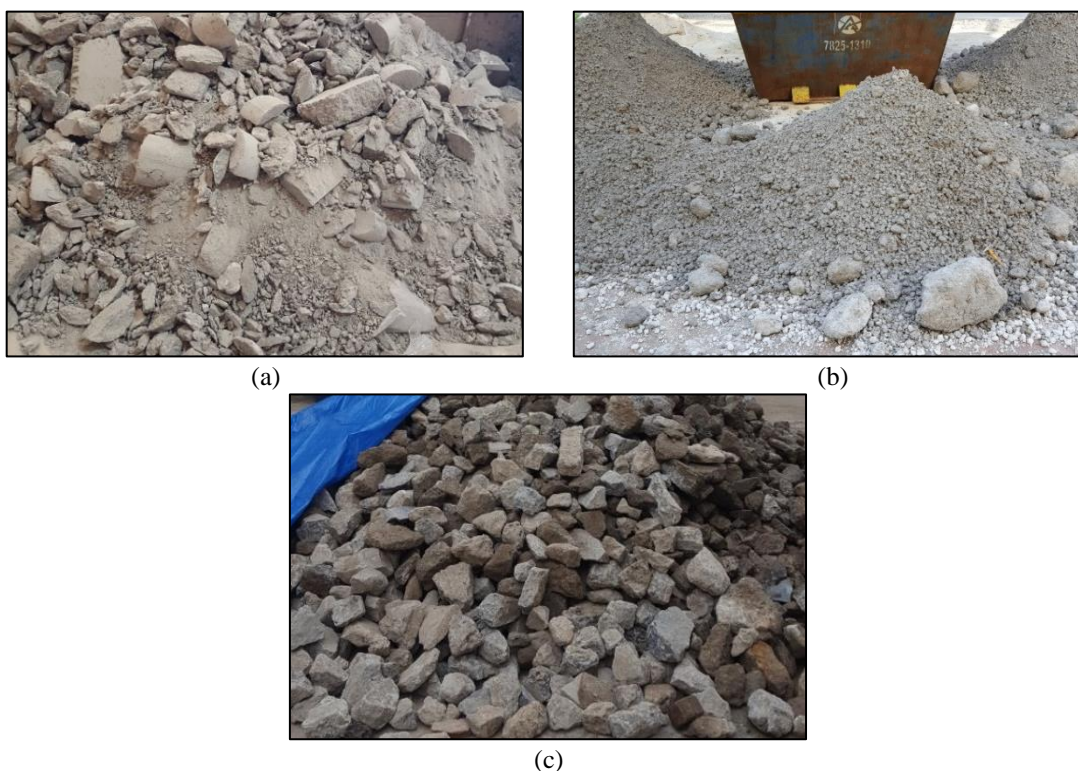
O resíduo RCA\_L foi produzido no Laboratório de Concretagem do NUMATS/COPPE/UFRJ. Seu processo de produção é explicado ainda neste capítulo. Este material apresenta propriedades conhecidas e pode ser considerado livre de contaminação. Assim, a finalidade de utilizar este resíduo é comparar o desempenho deste material com o comportamento apresentado pelos resíduos externos (RCA\_C e RCA\_D).

O resíduo RCA\_C foi fornecido pela usina de concreto Supermix, localizada no Rio de Janeiro-RJ. Este material é proveniente da lavagem do resíduo de concreto de

caminhões-betoneira, que retornam com as sobras de material das obras para a usina. Ele foi entregue ainda no estado fresco e então, foi aguardado que ele completasse 28 dias de idade para que iniciasse o processo de britagem. Por ser um resíduo de diferentes obras, suas propriedades são desconhecidas.

O resíduo RCA\_D é proveniente de uma usina de reciclagem de resíduos de demolição (FOCCUS) localizada em Praia Grande-SP. Nesta usina, os resíduos são previamente separados em resíduos de concreto e resíduos cerâmicos, onde somente o primeiro é objeto desta pesquisa. Por ser um resíduo de diferentes concretos de demolição, suas propriedades físicas e químicas são desconhecidas e sua idade é indeterminada.

Todos os resíduos foram submetidos às mesmas etapas de beneficiamento: britagem, peneiramento mecânico, homogeneização e secagem. Estas etapas são apresentadas neste capítulo.



**Figura 2.1 – Resíduos de concreto utilizados: (a) RCA\_L; (b) RCA\_C; (c) RCA\_D**

### **2.2.2. Metodologia de produção do resíduo do laboratório (RCA\_L)**

A produção do concreto de origem do resíduo RCA\_L foi realizada no Laboratório de Concretagem do NUMATS/COPPE/UFRJ.

Para a composição do concreto, foram utilizados agregados naturais (areia e brita 0), com dimensão máxima de 9,5 mm, cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI) e superplastificante Glenium 51. Como o objetivo era produzir um concreto com resistência média de 30 MPa aos 28 dias, utilizou-se um fator água/cimento alto ( $a/c=0,6$ ) e um consumo de cimento baixo. Além disso, a escolha pelo uso de um agregado com dimensão máxima de 9,5 mm visava à obtenção de agregados reciclados de dimensão máxima de 19 mm com grande teor de argamassa aderida. A composição do concreto é apresentada na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 – Composição do concreto de origem RCA\_L**

<b>Materiais</b>	<b>Composição (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Brita 0 Natural</b>	894,5
<b>Areia Natural</b>	815,2
<b>Cimento CPV-ARI</b>	353,0
<b>Superplastificante Glenium 51</b>	3,5
<b>Água total</b>	211,4

Os concretos foram produzidos em misturador planetário e, após a mistura, foram colocados em moldes cilíndricos de 15 x 30 cm (Figura 2.2-a). A desmoldagem ocorreu após 24 horas e eles foram mantidos em câmara úmida por 28 dias. Nesta idade, os corpos de prova foram posicionados horizontalmente em prensa mecânica, modelo WPM com capacidade de 3000 kN, e levados à ruptura para que fossem fragmentados até o tamanho adequado para a realização da britagem (Figura 2.2-b). A escolha pela ruptura diametral teve como objetivo a otimização do processo de fragmentação.



**Figura 2.2 – Etapas da produção do resíduo RCA\_L: (a) Corpos de prova do concreto de origem; (b) Concreto fragmentado após ruptura**

Os concretos apresentaram resistência média de 32,8 MPa e módulo de elasticidade de 22,3 GPa aos 28 dias. No total, foram realizadas 30 moldagens para a produção de 600 corpos de prova, quantidade equivalente a 7000 kg de concreto.

### 2.2.3. Metodologia de produção dos agregados reciclados

Nessa seção é apresentada metodologia utilizada para a transformação dos resíduos de concreto em agregados reciclados, com cada uma das etapas realizadas.

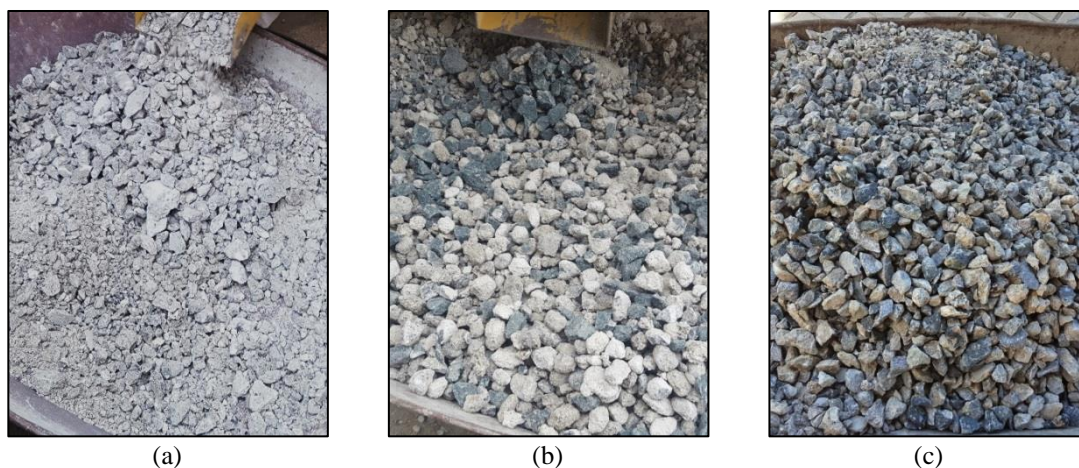
#### 2.2.3.1. Britagem

A britagem dos resíduos foi realizada no laboratório do NUMATS/COPPE/UFRJ. Foi utilizado o britador de mandíbulas móvel QUEIXADA 200 que fratura o material por esmagamento e produz dois tamanhos de material (fino e grosso). Esta divisão não separa os grãos em agregado miúdo e agregado graúdo, pois a separação não é feita em malha de peneira padronizada. Este britador possui três saídas: uma para a fração grossa e duas para a fração fina, sendo a primeira produzida em maior quantidade. A Figura 2.3 apresenta o equipamento utilizado e a saída da fração fina após a cominuição.



**Figura 2.3 – Britador de mandíbulas móvel QUEIXADA 200: (a) equipamento; (b) saída da fração fina**

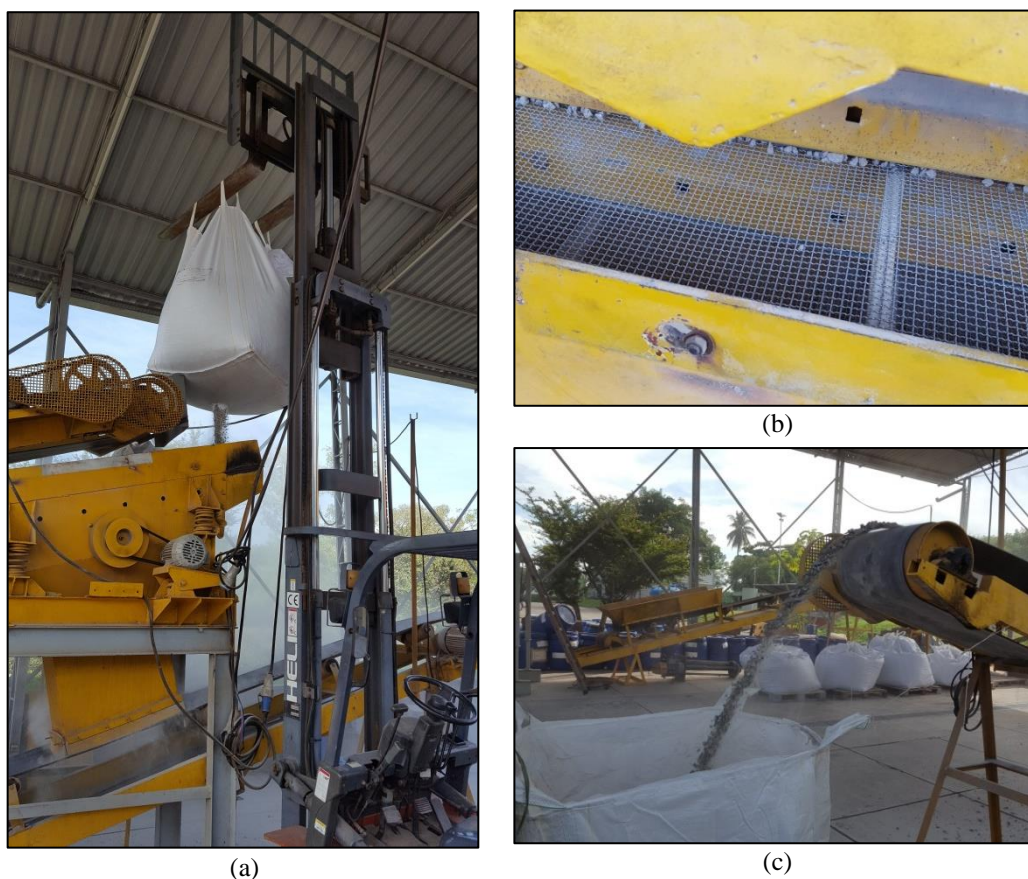
A Figura 2.4 ilustra a fração grossa de cada resíduo após a fragmentação no britador. Após este processo, as frações fina e grossa de cada um dos resíduos foram armazenadas em big bags até a etapa de peneiramento.



**Figura 2.4 – Fração grossa dos resíduos após a britagem: (a) RCA\_L; (b) RCA\_C; (c) RCA\_D**

### 2.2.3.2. *Peneiramento mecânico*

O peneiramento mecânico foi realizado no laboratório do CETEM/UFRJ. Alguns detalhes deste processo são mostrados na Figura 2.5.



**Figura 2.5 – Etapas do peneiramento: (a) posicionamento da big bag na parte superior do peneirador; (b) detalhe de uma das peneiras utilizadas; (c) saída de uma fração do material após o peneiramento**

Visando simular um processamento em escala industrial, foi utilizado um peneirador mecânico industrial com as peneiras: 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm. O material retido na peneira 9,5 mm e passante na peneira 19 mm foi classificado como Brita 1 (B1) e o material retido na peneira 4,8 mm e passante na peneira de 9,5 mm foi classificado como Brita 0 (B0). Essas classes foram baseadas na classificação dos agregados naturais comercializados na cidade do Rio de Janeiro, pois um dos objetivos do trabalho era comparar o comportamento dos agregados naturais com o de agregados reciclados nas mesmas frações granulométricas. Os materiais classificados como maiores que 19 mm e menores que 4,8 mm foram armazenados no laboratório para utilização em outras pesquisas. Após essa etapa, foram incluídas as siglas B0 e B1 ao final da identificação de cada resíduo para se referir aos agregados separados nas classes Brita 0 e Brita 1, respectivamente.

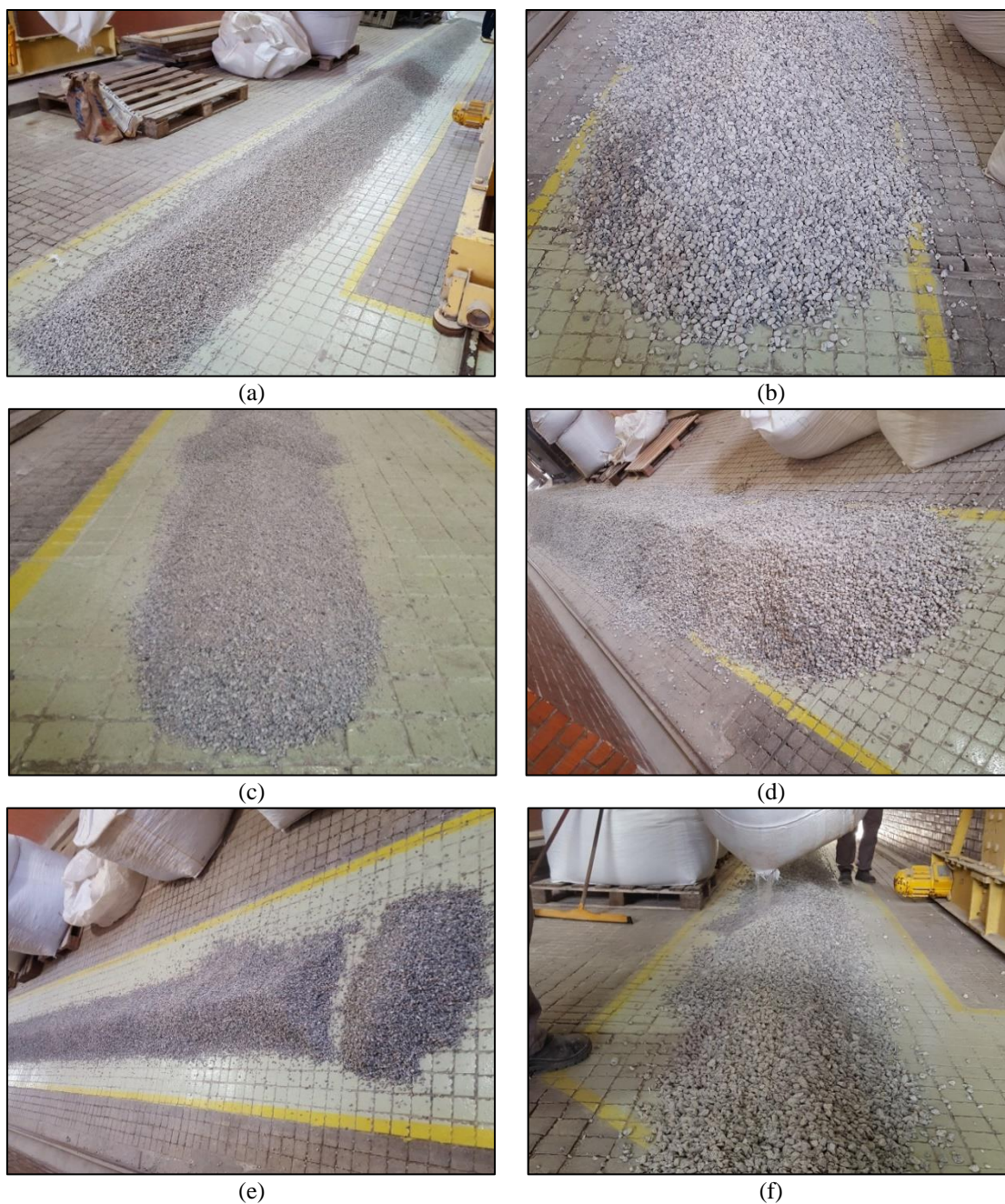
Como a finalidade desta pesquisa era utilizar somente agregados graúdos, apenas a fração grossa saída do britador foi peneirada por este sistema. Posteriormente, a fração fina foi peneirada no próprio laboratório por outros alunos.

#### 2.2.3.3. *Pilha de homogeneização*

A homogeneização dos agregados reciclados foi realizada através do método de pilha alongada (Figura 2.6) no laboratório do NUMATS/COPPE/UFRJ.

Este procedimento é utilizado para uniformizar grandes quantidades de material e consiste em espalhar alternadamente e em sentidos opostos aproximadamente a mesma quantidade de material ao longo de uma pilha. Após a distribuição de todo o material, o agregado disposto nas extremidades da pilha é separado e distribuído novamente.

Para isso, uma talha mecânica foi utilizada para levantar a big bag e foi feito um furo em sua parte inferior. Assim, o material foi despejado gradativamente ao longo da pilha, sempre em sentidos contrários alternadamente.



**Figura 2.6 – Pilha de homogeneização: (a) RCA\_L\_B0; (b) RCA\_L\_B1; (c) RCA\_C\_B0; (d) RCA\_C\_B1; (e) RCA\_D\_B0; (f) RCA\_D\_B1**

#### 2.2.3.4. *Secagem*

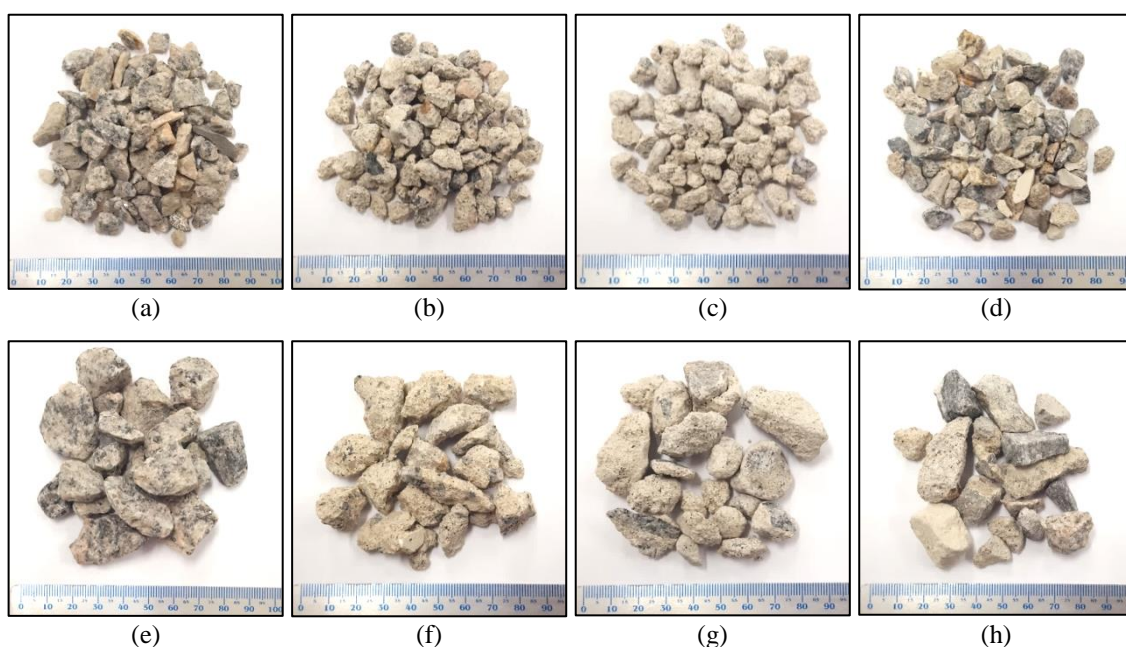
A secagem de todos os agregados foi realizada ao sol, espalhando-se o material em uma área descoberta no início da manhã e recolhendo-o ao final do dia. Após a secagem, os materiais foram armazenados em bombonas plásticas com tampa para que não absorvessem umidade.

#### 2.2.4. Agregados graúdos naturais e reciclados

Durante o processamento dos resíduos, também foram obtidos os agregados naturais do estudo. Os agregados graúdos utilizados pertenciam a duas classes de brita: Brita 0, com dimensão máxima de 9,5 mm e Brita 1, com dimensão máxima de 19 mm.

As britas de origem natural são provenientes da britagem de rochas graníticas, da Pedreira BritaBrás, localizada no Rio de Janeiro. A sigla escolhida para identificar as britas naturais foi Nat\_B0 para a brita 0 e Nat\_B1 para a brita 1.

Assim, a Figura 2.7 apresenta uma amostra de todos os agregados graúdos que foram utilizados neste estudo.



**Figura 2.7 – Amostra dos agregados graúdos: (a) Nat\_B0; (b) RCA\_L\_B0; (c) RCA\_C\_B0; (d) RCA\_D\_B0; (e) Nat\_B1; (f) RCA\_L\_B1; (g) RCA\_C\_B1; (h) RCA\_D\_B1**

#### 2.2.5. Métodos de ensaios dos agregados

Os métodos de ensaios da etapa de caracterização dos agregados são apresentados a seguir. Optou-se por seguir as determinações de ensaios definidas nas normas vigentes da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Como a maioria dos ensaios foram realizados no laboratório do NUMATS/COPPE/UFRJ, a indicação do local de realização ao longo do texto somente será apresentada nos casos em que os ensaios foram feitos em outros laboratórios.



#### 2.2.5.1. *Composição granulométrica*

O peneiramento mecânico a seco foi utilizado para a determinação da granulometria dos agregados, baseado na norma ABNT NBR NM 248 (2003). Ele foi realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ.

#### 2.2.5.2. *Massa Específica*

Para a determinação da massa específica dos agregados graúdos, tanto naturais quanto reciclados, foram adotadas as especificações da ABNT NBR NM 53 (2009). A única adaptação realizada foi em relação à temperatura de secagem dos agregados reciclados. Pela norma, os agregados deveriam ser secos em estufa à  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, mas como esta temperatura poderia iniciar o processo de decomposição de produtos de hidratação do cimento, optou-se por secar estes agregados em estufa à  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  até constância de massa.

#### 2.2.5.3. *Absorção Total de Água*

A determinação da absorção de água total dos agregados graúdos foi realizada através especificações da ABNT NBR NM 53 (2009). Neste ensaio, também foi realizada a secagem dos agregados reciclados até constância de massa em estufa à  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

#### 2.2.5.4. *Absorção de Água no tempo*

Para os agregados reciclados, além da massa específica e da absorção total, foi determinada a capacidade de absorção de cada um destes materiais ao longo do tempo. Para isso, foi realizada uma adaptação da norma ABNT NBR NM 53 (2009) para a determinação da absorção de água em diferentes intervalos de tempo. Desta forma, foi possível definir uma curva de absorção de água de cada agregado reciclado em função do tempo.

Como estes agregados foram utilizados na condição seca ao sol durante todo o estudo, optou-se por ensaiar amostras nesta mesma condição de umidade para simular com mais precisão o comportamento destes agregados no processo de mistura dos concretos. As amostras foram imersas em água à temperatura ambiente durante os seguintes intervalos de tempo: 2, 5, 10, 30 e 60 minutos. A absorção foi medida através da secagem da

superfície dos grãos com um pano absorvente seguida pela pesagem da amostra. A Equação (2.1) apresenta o cálculo para a absorção da amostra no intervalo de tempo t:

$$A_t(\%) = \frac{m_t - m}{m} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Onde:

$A_t$  é a absorção de água do material em t minutos;

$m$  é a massa inicial do material seco;

$m_t$  é a massa do material com superfície seca após imersão no intervalo de tempo t.

#### 2.2.5.5. Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão “Los Angeles” mede a resistência dos grãos do agregado graúdo ao desgaste superficial quando submetido ao atrito. Este ensaio foi realizado de acordo com as determinações da norma ABNT NBR NM 51 (2001) no Laboratório de Tecnologia Mineral do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ.

O ensaio consiste em colocar a amostra dentro do equipamento “Los Angeles” juntamente com um número estabelecido de esferas de ferro. As etapas do ensaio de abrasão “Los Angeles” são apresentadas na Figura 2.8.



**Figura 2.8 – Etapas do ensaio de abrasão “Los Angeles”: (a) amostra de material antes do ensaio; (b) amostra de material após o ensaio**

Cada fração de cada uma das britas, definidas pela norma, foi lavada inicialmente para remover o pó aderido aos grãos e seca em estufa à  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  até constância de massa. Após a secagem, estas frações foram misturadas para a realização do ensaio. Além disso, foram feitas duas determinações em cada material para cálculo do desgaste por abrasão.

#### 2.2.5.6. Índice de forma

O índice de forma consiste em avaliar a relação entre o comprimento e a espessura dos grãos de cada agregado. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 7809 (2006). Para isso, cada material foi dividido em quatro frações baseadas na composição granulométrica de cada agregado. As peneiras utilizadas para este ensaio foram as mesmas definidas na norma ABNT NBR NM 248 (2003).

O ensaio consiste em medir o comprimento e a espessura de cada um dos grãos, com o auxílio de um paquímetro. O índice de forma é dado pela média da relação comprimento/espessura do total de 200 grãos de cada agregado.

#### 2.2.5.7. AIMS (*Aggregate Image Measurement System*)

Para complementar o estudo da forma dos agregados graúdos, foi realizado um método de Processamento Digital de Imagens (PDI), apresentado por CASTELO BRANCO *et al.* (2006), através do equipamento AIMS - *Aggregate Image Measurement System*. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Neste equipamento, os agregados são analisados quanto à forma, textura e angularidade através de um sistema simples, que consiste em uma câmera e dois diferentes tipos de iluminação para capturar imagens de agregados em diferentes resoluções, das quais as propriedades são avaliadas usando técnicas de análise de imagens. Cada agregado foi separado nas frações granulométricas apresentadas na Tabela 2.3 e a análise foi realizada através da captura de imagens de 50 grãos de cada uma dessas classes.

**Tabela 2.3 – Tamanho dos grãos analisados no AIMS**

<b>Material</b>	<b>Retido na peneira (mm)</b>
<b>Brita 0 – Natural e Recicladas</b> <b>(4,75 a 9,5 mm)</b>	4,75
	6,3
	9,5
<b>Brita 1 – Natural e Recicladas</b> <b>(9,5 a 19 mm)</b>	12,5
	16,0

#### 2.2.5.8. Teor de argamassa aderida – Método do choque térmico

Conforme apresentado no início desse capítulo, as principais propriedades dos agregados reciclados de concreto estão relacionadas ao teor de argamassa aderida aos grãos. Por isto, é de extrema importância quantificar esta fase presente nos agregados reciclados. Para isto, foi utilizado o método de choque térmico baseado nos métodos propostos por PEPE *et al.* (2014) e PANDURANGAN *et al.* (2016). Os detalhes deste ensaio são apresentados na Figura 2.9.



**Figura 2.9 – Teor de argamassa aderida – Método do choque térmico: (a) forno utilizado para manter o material à 600°C; (b) colocação do material no forno; (c) detalhe do material após a fricção no pano; (d) amostra após a remoção da argamassa aderida**

Este ensaio consiste em aplicar uma grande diferença de temperatura em um curto período de tempo a uma amostra previamente seca em estufa à  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  até constância de massa para que a argamassa aderida se tornasse mais frágil, de modo a facilitar sua remoção dos grãos. Para isso, a amostra foi colocada em água à temperatura de  $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 10 minutos e logo em seguida, foi colocada diretamente em um forno à  $600^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por duas horas. Após este período, o material foi colocado novamente em água à  $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 10 minutos. Em seguida, os grãos foram friccionados em um pano, de forma que a argamassa aderida se desprendesse do grão natural e lavados em peneira com abertura de malha de 1,7 mm para garantir que toda a argamassa aderida fosse

removida. Por fim, a amostra retida na peneira foi seca novamente em estufa à  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  até constância de massa e sua massa foi anotada.

O teor de argamassa aderida é calculado pela Equação (2.2).

$$AA (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Onde:

$AA (\%)$  é o teor de argamassa aderida aos grãos do material;

$m_i$  é a massa inicial do material seco;

$m_f$  é a massa final do material seco após o ensaio de choque térmico.

### ***2.3. Apresentação e análise dos resultados***

Nessa seção são apresentados os principais resultados obtidos nessa parte do estudo. No final, um parâmetro de controle de qualidade para a classificação dos diferentes tipos de agregados reciclados de concreto é apresentado, com base nos resultados de caracterização.

#### ***2.3.1. Levantamento da quantidade de agregados reciclados após o processamento, de acordo com a origem do resíduo***

O conhecimento da proporção de agregados reciclados produzidos é fundamental para que se busquem as melhores alternativas para a aplicação de cada fração granulométrica.

Esta pesquisa faz parte de um grupo de estudos desenvolvido no laboratório NUMATS/COPPE/UFRJ que visa estudar aplicações para todas as frações de materiais reciclados produzidos, ou seja, tem como objetivo viabilizar o uso integral dos ARCs. Desta forma, foi realizado um levantamento das quantidades de cada classe granulométrica de cada um dos resíduos após o peneiramento. Esse levantamento é apresentado na Tabela 2.4.

Nota-se que a soma das quantidades de Brita 1 e Brita 0 representa aproximadamente metade da quantidade total produzida. Isso mostra a importância de se buscar uma aplicação economicamente viável para essas classes de resíduo. Outro fato de destaque

é a grande quantidade da fração areia produzida, indicando que este material também carece de um estudo mais aprofundado visando sua aplicabilidade.

**Tabela 2.4 – Levantamento das quantidades de cada fração granulométrica produzida**

Fração granulométrica	RCA_L		RCA_C		RCA_D	
	kg	%	kg	%	Kg	%
<b>Maior que 19 mm</b>	341	5,0	360	5,7	648	9,8
<b>Brita 1 (9,5 - 19 mm)</b>	2350	34,8	1673	26,7	3955	59,8
<b>Brita 0 (4,8 - 9,5 mm)</b>	798	11,8	663	10,6	554	8,4
<b>Areia (150 µm – 4,8 mm)</b>	2904	43,0	3294	52,5	1252	18,9
<b>Finos (menor que 150 µm)</b>	266	3,9	192	3,1	131	2,0
<b>Perdas</b>	97	1,4	94	1,5	70	1,1
<b>Total</b>	6756	100	6276	100	6610	100

O resíduo RCA\_D apresentou maior quantidade de Brita 1 e isso pode ser explicado por ser originado de um concreto com idade mais avançada, proveniente de demolição de estruturas. Isso torna o concreto menos frágil e o material é menos fragmentado. Já com os resíduos RCA\_L e RCA\_C ocorreu o contrário, eles apresentaram grandes quantidades de materiais menores que 4,8 mm devido a sua idade mais recente (britagem realizada com 28 dias).

As perdas do sistema podem ser consideradas pequenas para um processamento em escala industrial e estão relacionadas principalmente ao transporte, ao peneiramento e à britagem. Foi observado que a perda era composta basicamente por materiais mais finos que ficavam suspensos no ar e depois se depositavam no chão durante as etapas de britagem e peneiramento. Além disso, as quantidades de material maior que 19 mm também podem ser consideradas pequenas.

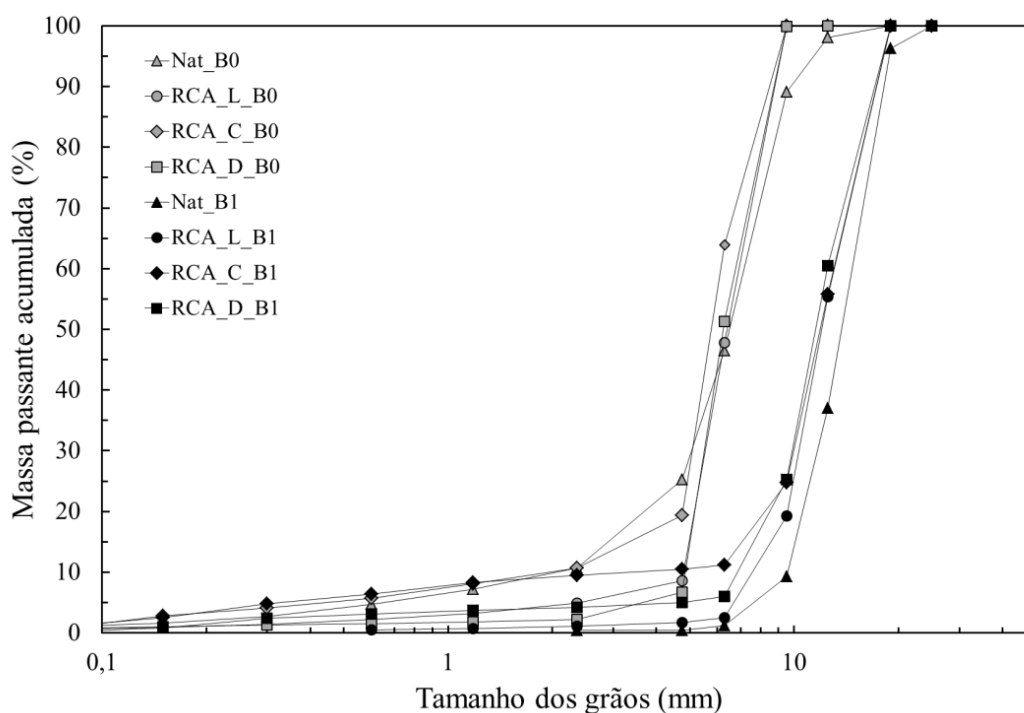
### ***2.3.2. Propriedades dos agregados de resíduo de concreto e parâmetros de controle de qualidade***

Após a obtenção de todos os agregados graúdos, foi realizada uma extensa caracterização de suas propriedades. Para isso, foram utilizados os métodos descritos na seção anterior.

Essa caracterização foi imprescindível para determinar a escolha dos materiais que seriam utilizados para a composição de concretos. Além disso, o conhecimento das propriedades de cada material é fundamental para a aplicação adequada do método de dosagem científica, que será descrito no próximo capítulo.

Dessa forma, a composição granulométrica dos agregados é apresentada na Figura 2.10. Os agregados RCA\_L\_B1, RCA\_C\_B1 e RCA\_D\_B1 são compostos por grãos ligeiramente menores que o Nat\_B1. Isso ocorreu provavelmente devido ao ajuste feito no britador dos resíduos para que fossem obtidas pequenas quantidades de material maior que 19 mm.

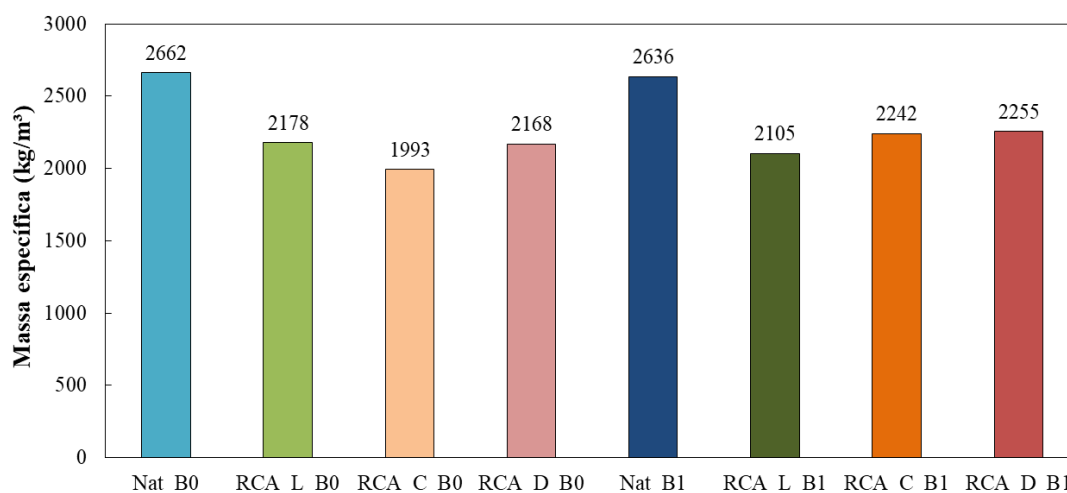
Em relação à fração brita 0, nota-se que tanto a brita Nat\_B0 quanto a RCA\_C\_B0 apresentam quantidades consideráveis de grãos menores que 4,75 mm. É possível que o agregado natural não tenha sido peneirado nesta malha na pedra de origem, enquanto o RCA\_C\_B0 pode ter se fragmentado durante o ensaio de granulometria.



**Figura 2.10 – Composição granulométrica dos agregados**

A Figura 2.11 apresenta os resultados experimentais de massa específica para os agregados naturais e reciclados. Conforme o esperado, a massa específica de todos os agregados reciclados foi menor que as apresentadas pelos respectivos agregados naturais. Comparando-se as massas específicas das britas 0, nota-se que a RCA\_C\_B0 apresenta o menor valor nesta propriedade, enquanto as britas RCA\_L\_B0 e

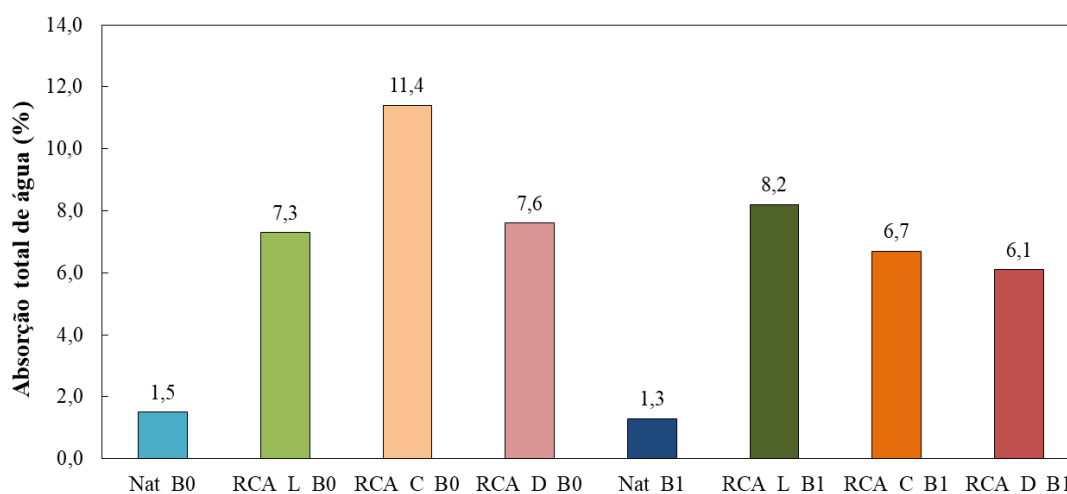
RCA\_D\_B0 apresentam aproximadamente o mesmo valor de massa específica. Para as britas 1, a RCA\_L\_B1 possui o menor valor de massa específica, enquanto as britas RCA\_C\_B1 e RCA\_D\_B1 tem massas específicas semelhantes.



**Figura 2.11 – Resultados de massa específica dos agregados naturais e reciclados**

Os valores obtidos são inferiores aos disponíveis na literatura. De acordo com um levantamento realizado por SILVA *et al.* (2014), a média dos valores de massa específica de agregados reciclados de concreto encontrados em diversas publicações são próximos de 2300 kg/m³. Esta propriedade é influenciada pela dimensão máxima dos grãos e, na maioria destes estudos, foram utilizados agregados com dimensão máxima de 25 mm.

Os resultados de absorção total de água dos agregados graúdos são apresentados na Figura 2.12

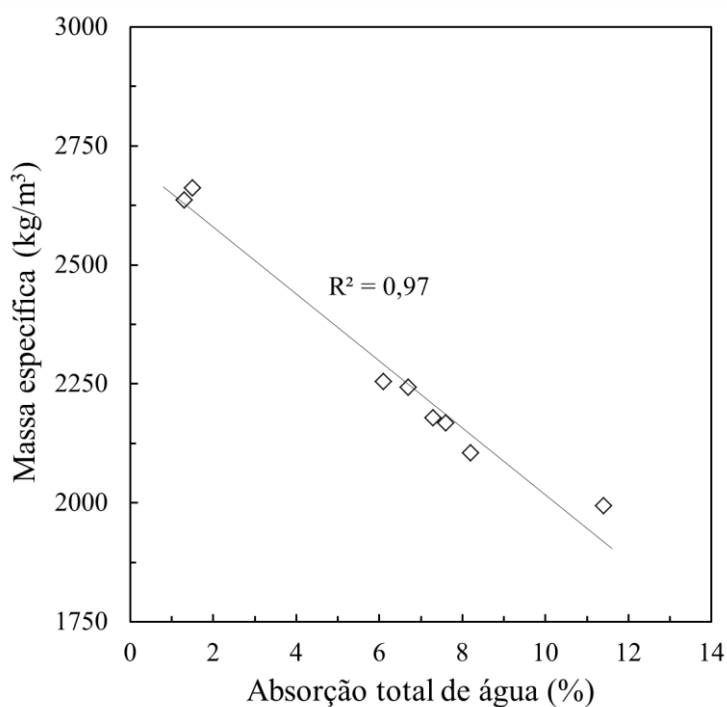


**Figura 2.12 – Resultados de absorção total dos agregados graúdos naturais e reciclados**



Em relação a esses resultados, foi possível observar que os valores de absorção dos agregados reciclados foram consideravelmente maiores que os obtidos para os respectivos agregados naturais. As britas RCA\_C\_B0 e RCA\_L\_B1 apresentaram valores de 11,4% e 8,2%, respectivamente, e foram as que apresentaram os maiores valores de absorção de sua classe granulométrica. Assim como observado para os resultados de massa específica, os pares RCA\_L\_B0 / RCA\_D\_B0 e RCA\_C\_B1 / RCA\_D\_B1 apresentaram valores muito próximos de absorção total de água. De acordo com ECKERT & OLIVEIRA (2017), os valores de absorção podem variar entre 3 e 13%, dependendo da qualidade e quantidade da argamassa aderidas aos grãos.

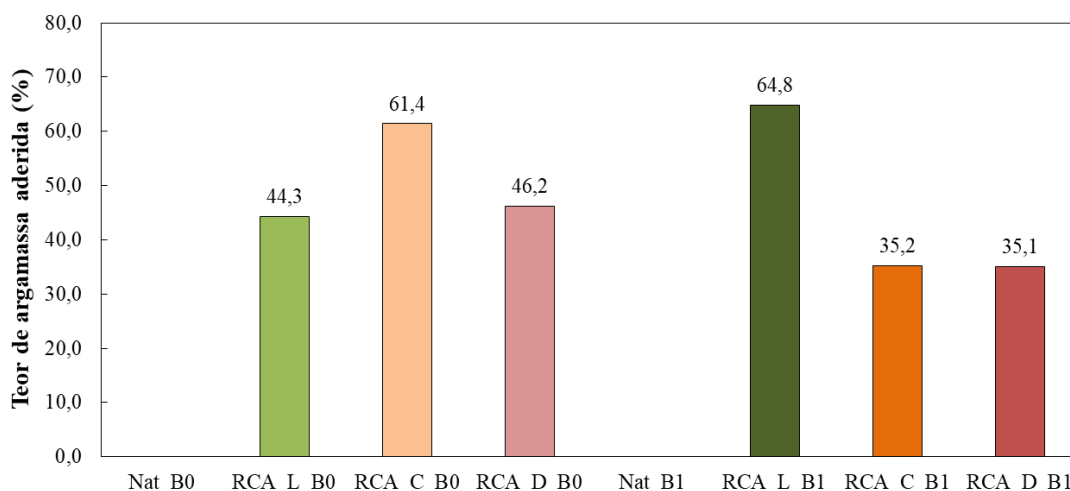
Conforme apresentado na revisão da literatura, quanto maiores os valores de absorção de água menores são os valores de massa específica destes agregados. A Figura 2.13 mostra a relação entre estas propriedades com base nos resultados obtidos. É possível notar que realmente estas propriedades estão fortemente correlacionadas.



**Figura 2.13 – Correlação entre os valores de massa específica e absorção total de água dos agregados graúdos**

Conforme apresentado na revisão de literatura, a principal diferença entre os ARCs e os agregados naturais é a presença de uma pasta de cimento envelhecida (argamassa aderida) na superfície dos agregados reciclados. Assim, o teor de argamassa aderida foi

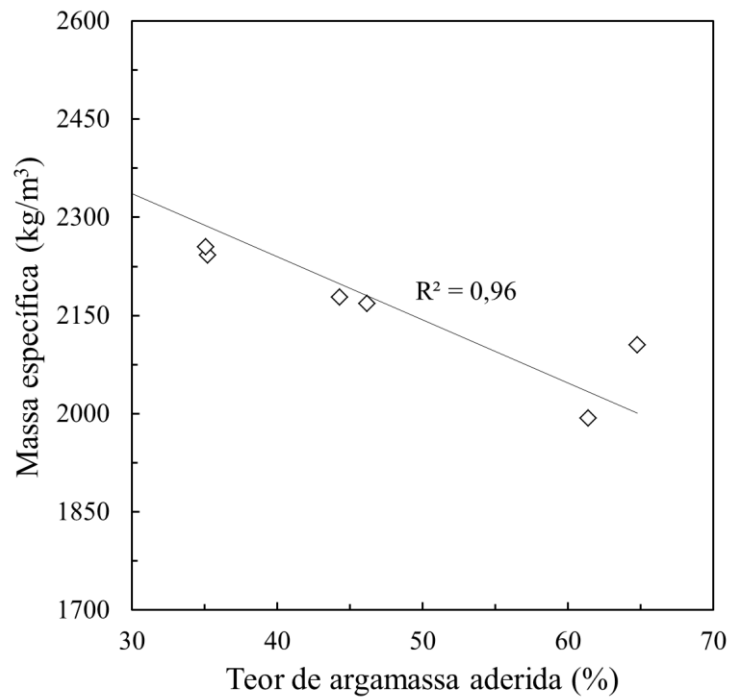
calculado com base no método do choque térmico. Esses resultados são apresentados na Figura 2.14.



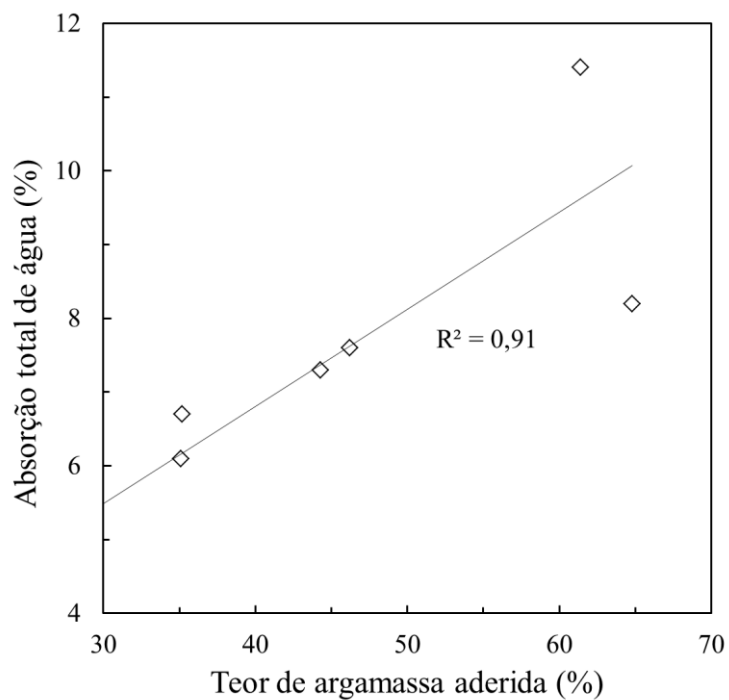
**Figura 2.14 – Resultados de teor de argamassa aderida para os agregados graúdos naturais e reciclados**

Com base nos resultados, nota-se que as britas RCA\_C\_B0 e RCA\_L\_B1 são as que apresentaram os maiores valores de argamassa aderida aos grãos em suas classes granulométricas. Este resultado é coerente, visto que estes também foram os agregados que apresentaram maiores valores de absorção de água e menores valores de massa específica. Geralmente, a argamassa aderida apresenta maior porosidade e menor massa específica que os agregados naturais e está diretamente relacionada à qualidade do agregado. Acredita-se que o RCA\_L\_B1 possua esta grande quantidade de argamassa aderida (64,8%) devido à escolha de produzir um resíduo de concreto com grãos de dimensão máxima de 9,5 mm. Assim, este agregado é formado em grande parte por argamassa aderida aos grãos. Já o elevado teor de argamassa aderida do agregado RCA\_C\_B0 pode estar ligado à baixa qualidade do concreto de origem, uma vez que este resíduo é proveniente da lavagem de caminhões-betoneira.

A Figura 2.15 apresenta a correlação entre os valores de massa específica e teor de argamassa aderida e a Figura 2.16 mostra a correlação entre os valores de absorção total de água e teor de argamassa aderida dos agregados.



**Figura 2.15 – Correlação entre os valores de massa específica e teor de argamassa aderida dos agregados**

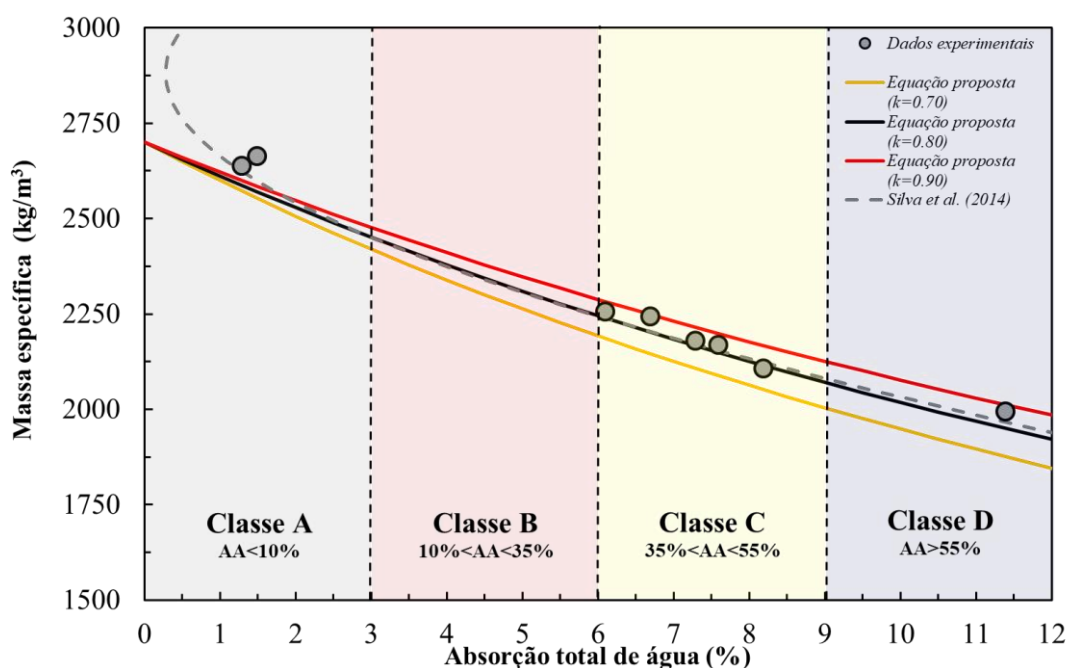


**Figura 2.16 – Correlação entre os valores de absorção total de água e teor de argamassa aderida dos agregados**

Através da análise destes gráficos, observa-se que realmente a massa específica é uma propriedade inversamente proporcional ao teor de argamassa aderida, enquanto a absorção é diretamente afetada pelo teor de argamassa presente nos grãos. Esses

gráficos demonstram que a avaliação do teor de argamassa aderida permite uma interpretação das principais propriedades dos agregados reciclados, independente das propriedades do concreto de origem e da sua classe granulométrica.

Na literatura, SILVA *et al.* (2014) propôs uma relação empírica para descrever esse comportamento. No entanto, como essas duas propriedades são fisicamente correlacionadas, uma nova abordagem baseada no teor de argamassa aderida é proposta para sua identificação (Figura 2.17). Mais detalhes sobre essa parte do estudo são apresentados por RANGEL *et al.* (2019).



**Figura 2.17 – Classificação proposta para agregados graúdos**

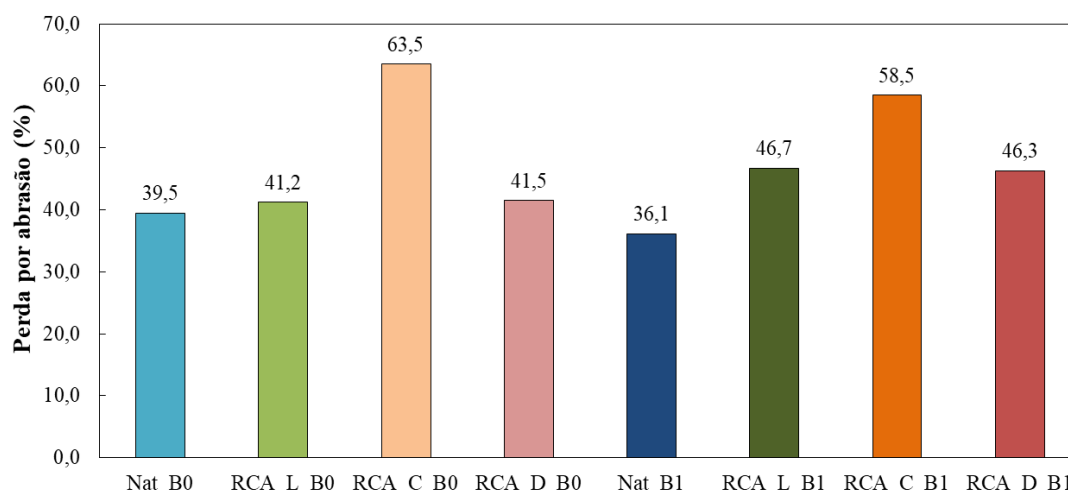
Através dessa abordagem, é possível propor uma abrangente classificação para controle de qualidade de agregados graúdos reciclados de resíduos de concreto, onde:

- **Classe A:** Agregados graúdos que apresentam valores de absorção total de água entre 0% e 3% e teor de argamassa aderida menor que 10%. Os agregados naturais estão incluídos nessa categoria;
- **Classe B:** Agregados graúdos que apresentam valores de absorção total de água entre 3% e 6% e teor de argamassa aderida entre 10% e 35%;
- **Classe C:** Agregados graúdos que apresentam valores de absorção total de água entre 6% e 9% e teor de argamassa aderida entre 35% e 55%;

- **Classe D:** Agregados graúdos que apresentam valores de absorção total de água maiores que 9% e teor de argamassa aderida maior que 55%.

Portanto, através dessa classificação, é possível determinar o teor de argamassa aderida, através de ensaios convencionais (massa específica e absorção total de água), independentemente da origem do resíduo.

Os resultados de perda por abrasão “Los Angeles” são mostrados na Figura 2.18.

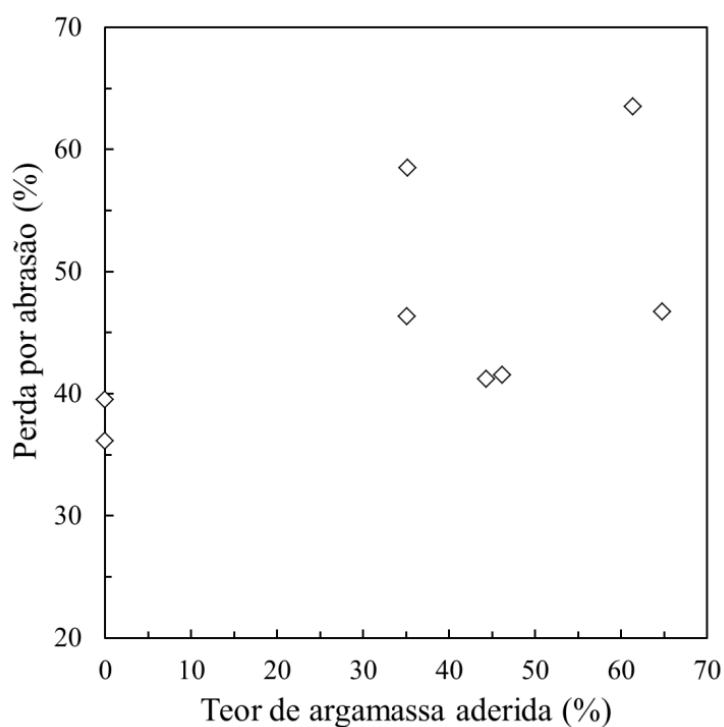


**Figura 2.18 – Resultados de perda por abrasão “Los Angeles” dos agregados graúdos naturais e reciclados desse estudo**

Esses resultados mostram que essa propriedade não está relacionada somente à quantidade de argamassa aderida, mas a qualidade dessa argamassa também pode ter influência no desgaste por abrasão. Dessa forma, a classificação para controle de qualidade dos agregados reciclados apresentado na Figura 2.17 não pode ser utilizado para o desgaste por abrasão, pois essa propriedade não é influenciada somente pelo teor de argamassa aderida. Além disso, tanto Nat\_B0 quanto Nat\_B1 apresentaram valores de perda por abrasão relativamente altos, considerando que estes materiais não possuem argamassa aderida aos grãos. De fato, todos os agregados reciclados apresentaram valores de perda por abrasão maiores que os agregados naturais, mas isto não pode ser relacionado somente ao teor de argamassa presente nos grãos.

A Figura 2.19 mostra a relação entre a perda por abrasão e o teor de argamassa aderida aos grãos de todos os agregados graúdos. Nota-se que não existe uma relação linear entre estas propriedades. Porém é evidente que o aumento no teor de argamassa aderida provoca um aumento no desgaste dos agregados reciclados, mas esta não é a única propriedade que influencia na perda por abrasão.

ZEGA & DI MAIO (2009) mostraram que o agregado natural do concreto de origem tem grande influência na perda por abrasão dos agregados reciclados. Os autores obtiveram valor de desgaste maior para o agregado natural do que para o agregado reciclado cujo agregado natural de origem era o mesmo do estudado. Assim, este resultado foi atribuído tanto à baixa qualidade do agregado natural de origem quanto à melhor interface argamassa-agregado.



**Figura 2.19 – Relação da perda por abrasão e do teor de argamassa aderida aos grãos**

As curvas de absorção de água dos agregados reciclados ao longo do tempo são apresentadas na Figura 2.20. Nota-se que todos os agregados reciclados apresentam uma grande capacidade de absorção que pode ser definida como a taxa que a água ingressa nos grãos. A absorção ocorre quase instantaneamente no momento de contato entre água/agregado e, aos 60 minutos, os agregados reciclados do resíduo RCA\_C já podem ser considerados saturados. Vale ressaltar que este ensaio foi realizado nas mesmas condições de umidade inicial (seco ao sol) dos agregados reciclados que foram utilizados ao longo do estudo e cada agregado apresenta um teor de umidade diferente que foi monitorado durante a pesquisa.

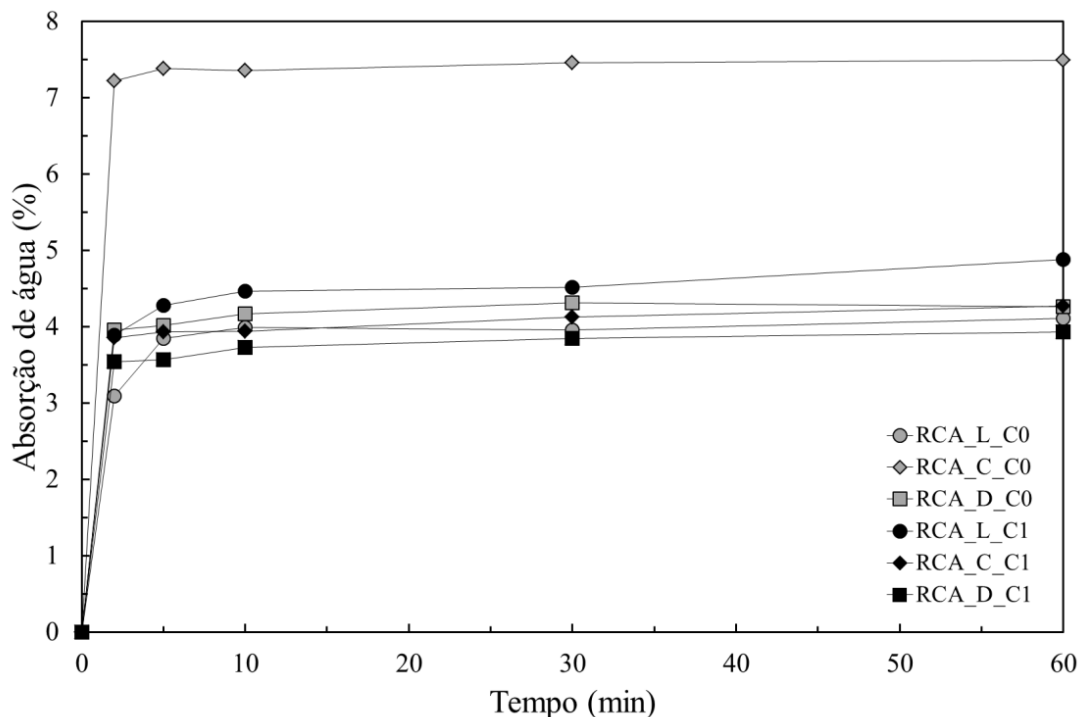


Figura 2.20 – Curvas de absorção de água em função do tempo para os agregados reciclados

Os resultados de índice de forma pelo método do paquímetro são apresentados na Figura 2.21.

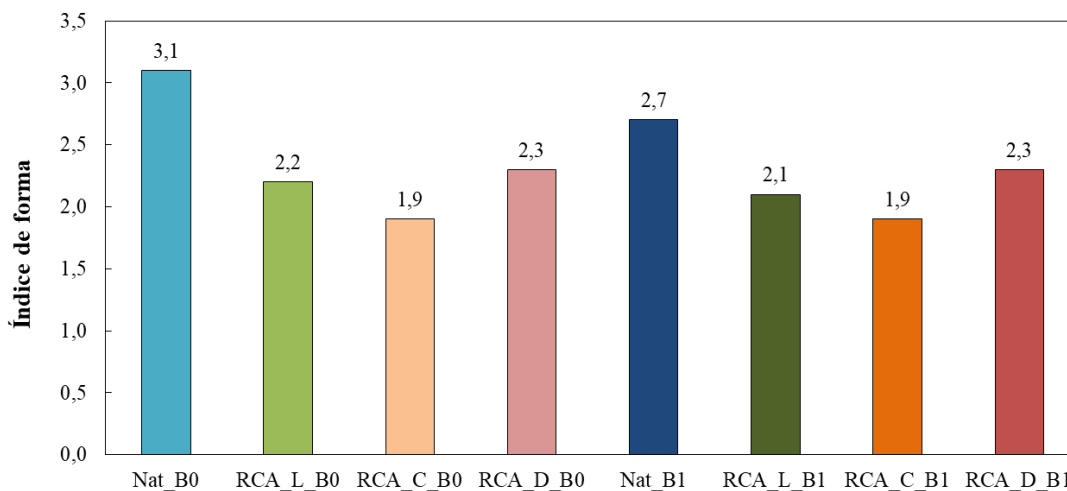
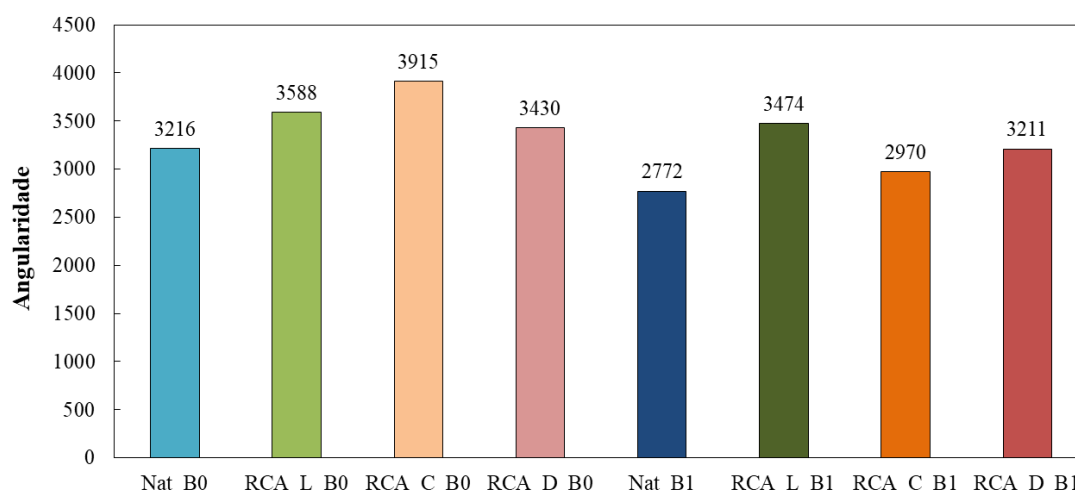


Figura 2.21 – Índice de forma pelo método do paquímetro para todos os agregados graúdos

Pelos valores obtidos para o índice de forma dos agregados reciclados é possível observar uma forte correlação entre a forma do agregado e o resíduo de origem. Pode-se assumir que este índice depende apenas das propriedades do concreto de origem e independe da classe granulométrica, pois todas as classes foram obtidas pelo mesmo processo de beneficiamento. Para os agregados naturais, este comportamento não

acontece, pois não é possível afirmar que tanto Nat\_B0 quanto Nat\_B1 foram produzidas pelo mesmo processo de britagem. Os agregados do resíduo RCA\_C apresentam forma mais arredondada, enquanto os agregados naturais Nat\_B0 e Nat\_B1 são mais angulares.

A angularidade medida através do ensaio de AIMS é apresentada na Figura 2.22.

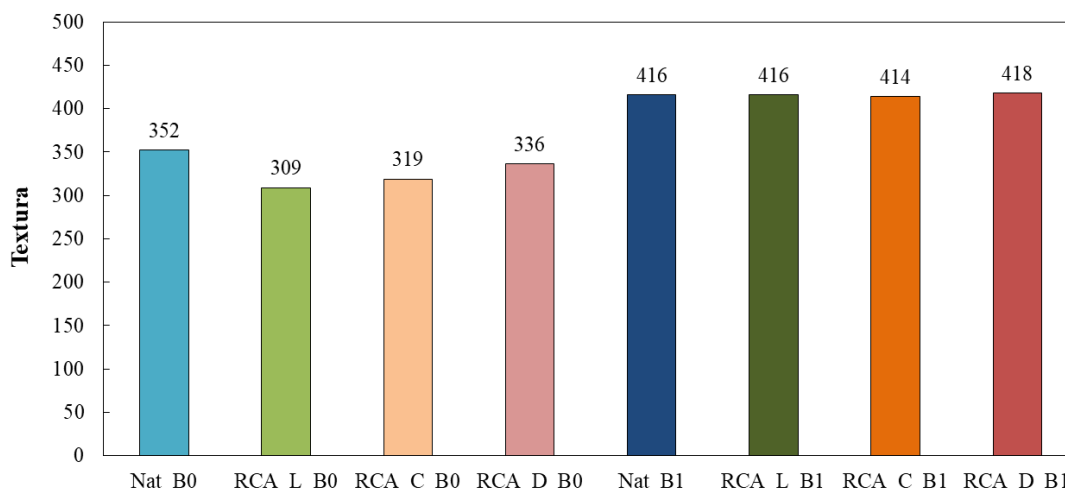


**Figura 2.22 – Angularidade obtida através do ensaio de AIMS para todos os agregados graúdos**

Essa propriedade consiste na medida das variações geométricas na superfície das partículas. Dessa forma, ela avalia o quão pontiagudas são as pequenas “quinas” dos grãos. A classificação de angularidade corresponde a: baixa (0-2100), moderada (2100-3975), alta (3975-5400) e extrema (5400-10000). Assim, valores de angularidade próximos de zero indicam que as partículas apresentam poucas irregularidades em sua superfície. Vale destacar que essa medida é mais difícil de ser percebida visualmente, sendo assim, somente uma análise numa escala microscópica seria capaz de avaliar essa propriedade. Os resultados mostraram que todos os agregados graúdos utilizados nesse estudo podem ser classificados como moderadamente angulares. O agregado RCA\_C\_B0 é o material que apresentou o maior valor nessa propriedade, podendo ser considerado o agregado graúdo que apresenta a superfície mais irregular, enquanto Nat\_B1, com o menor valor, pode ser considerado o material com a superfície mais lisa e suas “quinas” são mais suaves que as dos demais.

A textura dos agregados também pode ser obtida através do ensaio de AIMS e esses resultados são apresentados na Figura 2.23.



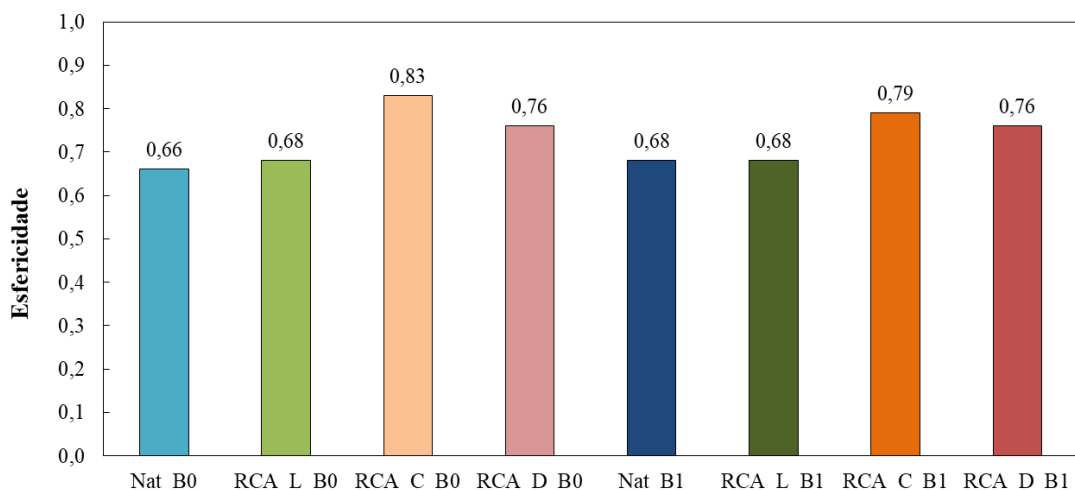


**Figura 2.23 – Textura dos agregados graúdos obtidas através do ensaio de AIMS**

Ela descreve a suavidade relativa da superfície do agregado graúdo. Enquanto a angularidade avaliava o tamanho das irregulares, a textura é uma medida da quantidade de irregulares presentes na superfície dos grãos, onde valores próximos a zero indicam uma superfície mais lisa e polida. Assim, a textura dos agregados pode ser definida como: baixa (0-200), moderada (200-500), alta (500-750) e extrema (750-1000). Os resultados mostraram que todos os agregados graúdos desse estudo podem ser classificados como moderados em relação à textura. Além disso, todos os agregados da fração brita 1 apresentaram maiores valores de textura do que os agregados da fração brita 0. Esse fato indica que os grãos menores apresentam uma superfície mais lisa e polida que os grãos maiores dos agregados correspondentes, sem influência significativa da origem do material.

Por fim, a esfericidade é a terceira propriedade que pode ser obtida pelo ensaio de AIMS e seus resultados são mostrados na Figura 2.24.

A esfericidade é uma propriedade que indica a forma tridimensional dos grãos. Assim, valores próximos de 1 indicam que as partículas apresentam as mesmas dimensões nas três direções ortogonais. A esfericidade pode ser classificada em: baixa (0-0,5), moderada (0,5-0,6), alta (0,6-0,8) e extrema (0,8-1,0). Com base nos resultados obtidos, apenas o agregado RCA\_C\_B0 apresenta esfericidade extrema, sendo todos os outros agregados graúdos desse estudo classificados com esfericidade moderada. Assim como observado no ensaio de índice de forma, há uma forte relação da esfericidade do agregado com a fonte de origem e a dimensão máxima do agregado não parece influenciar nessas propriedades.



**Figura 2.24 – Esfericidade dos agregados graúdos obtidos através do ensaio de AIMS**

## **2.4. Conclusões do capítulo**

Portanto, com base nos resultados obtidos nesse capítulo, conclui-se que:

- A quantidade total de cada fração granulométrica de agregado reciclado depende fundamentalmente da qualidade do concreto de origem, mantendo-se as etapas de processamento do resíduo constantes. Conforme visto durante esse capítulo, do resíduo RCA\_L, foram obtidos cerca de 55% de agregado graúdo e 35% de agregado miúdo, enquanto do resíduo RCA\_C, foi gerada uma grande quantidade de agregado miúdo (maior que 50%) e uma pequena quantidade de agregado graúdo (em torno de 36%). Em compensação, do resíduo RCA\_D, foi obtida grande quantidade de agregado graúdo (maior que 65%) e somente 18% de agregado miúdo. Apesar disso, em todos os resíduos, a quantidade de agregado reciclado gerado (agregado graúdo e miúdo) foi superior a 90%. Isso mostra que os resíduos de concreto apresentam um grande potencial para serem reciclados na forma de agregados para a produção de novos concretos.
- Em geral, as propriedades dos agregados reciclados também dependem da qualidade do concreto de origem. Quanto melhor é a qualidade do resíduo, menor é o desgaste por abrasão e a absorção total de água dos agregados reciclados.
- A identificação de um parâmetro para controle de qualidade (teor de argamassa aderida) foi fundamental para relacionar as principais propriedades dos agregados reciclados (absorção total de água e massa específica), ou seja, agregados que

apresentam um alto teor de argamassa aderida, tendem a apresentar uma elevada absorção de água e uma baixa massa específica.

- Visando reduzir a heterogeneidade dos agregados reciclados de resíduo de concreto, foi identificado um parâmetro para controle de qualidade (teor de argamassa aderida) que pode ser obtido através de ensaios mais simples, como absorção de água e massa específica. Através desse parâmetro, é possível separar os agregados reciclados em quatro classes distintas.

Por fim, com base em todos os resultados obtidos na etapa de caracterização dos agregados foi possível conhecer melhor o comportamento de cada material e esta etapa foi fundamental para que a dosagem de concretos com agregados reciclados fosse realizada de forma adequada e criteriosa. Porém, os agregados provenientes do resíduo da usina de concreto (RCA\_C\_B0 e RCA\_C\_B1) apresentaram propriedades muito inferiores aos outros agregados, com maior destaque aos resultados obtidos para absorção de água e perda por abrasão “Los Angeles”. Esses resultados caracterizam esses agregados como materiais de baixa qualidade e seu uso não é adequado para o desenvolvimento de concretos estruturais. Assim, tanto o RCA\_C\_B0 quanto o RCA\_C\_B1 não foram utilizados na produção e caracterização de concretos dessa pesquisa.

## Capítulo 3

# *Dosagem e comportamento físico e mecânico de concretos reciclados*

### **3.1. Revisão da literatura**

Conforme apresentado no capítulo anterior, os resíduos de concreto apresentam grande potencial para serem reciclados na forma de agregados para a produção de novos concretos. Contudo, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados em concretos afetam diretamente suas propriedades.

A maior porosidade apresentada pelos ARCs aliada a sua maior capacidade de absorção, isto é, maior velocidade de entrada de água nos grãos destes agregados pode prejudicar tanto as propriedades no estado fresco quanto no estado endurecido dos concretos reciclados.

Dessa forma, essa seção apresenta uma revisão sobre os principais métodos de dosagem utilizados para concretos reciclados e as principais propriedades desses concretos, com base em estudos presentes na literatura.

#### **3.1.1. Métodos de dosagem para concretos reciclados**

Os agregados representam cerca de 70% do volume de concreto, então é evidente que as propriedades de concretos reciclados são dependentes das propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados. Dois parâmetros influenciam fundamentalmente o comportamento de concretos reciclados: condição de umidade inicial do agregado e método de dosagem (TAM *et al.*, 2007; BRAND *et al.*, 2015).

No estado fresco, geralmente, para um mesmo teor de água, a trabalhabilidade do concreto reciclado é menor que em concretos naturais (GÜNEYISI *et al.*, 2016; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2017). Esta propriedade depende de uma série de fatores ligados ao agregado, como tamanho, forma, textura, teor de umidade inicial e absorção de água (KISKU *et al.*, 2017). As principais formas utilizadas para controlar a

trabalhabilidade de concretos reciclados são: aplicação de superplastificante e compensação de água (QUATTRONE *et al.*, 2016). Apesar da compensação de água ser mais vantajosa do ponto de vista econômico e ambiental e capaz de reduzir a absorção de água da mistura, o teor de água ideal a ser considerado deve ser criteriosamente determinado para evitar a ocorrência de segregação e o enfraquecimento da zona de transição entre a nova pasta de cimento e os agregados reciclados.

Estudos recentes têm sido realizados para avaliar a forma mais adequada de considerar a capacidade de absorção destes agregados na compensação de água da mistura (BRAND *et al.*, 2015). As principais condições de umidade estudadas são: seco em estufa, seco ao ar, imerso em água por 10 minutos, parcialmente saturado e saturado superfície seca.

MEFTEH *et al.* (2013) avaliaram a influência da utilização de três condições de umidade inicial (seco em estufa, parcialmente saturado e saturado superfície seca) nas propriedades do estado fresco e endurecido. Para os autores, as condições parcialmente saturado (pré-imersão do agregado por 1 minuto antes da mistura) e saturado superfície seca melhoraram a trabalhabilidade do concreto, porém o uso de agregados reciclados na condição saturado superfície seca provocou uma diminuição bem significativa nas propriedades mecânicas do concreto. Isso pode ter sido provocado pela adição de uma quantidade de água extra à mistura devido à ineficiência na secagem da superfície dos grãos.

AMARIO (2015) investigou a influência de cinco diferentes métodos de compensação de água em agregado reciclado e comparou com o comportamento do concreto de referência, que continha somente agregados naturais. Para isso, uma quantidade de extra de água foi adicionada a mistura, equivalente a quatro pontos importantes da curva de absorção de água no tempo. Foram eles: absorção de água após 10 minutos e 24 horas da curva de absorção no tempo e 50% e 70% da absorção total do agregado reciclado. Além disso, também foi considerada a condição saturado superfície seca. Para avaliar o comportamento dos concretos, foram realizados ensaios de abatimento de tronco de cone, resistência à compressão aos 7 dias e elevação adiabática de temperatura. O comportamento que mais se assemelhou com o do concreto de referência nos três ensaios foi o de compensação de água equivalente a 50% da absorção total. Como a única variável deste estudo era a quantidade de água de cada condição de umidade, concluiu-se que a quantidade ideal de compensação de água era equivalente a metade da absorção total do agregado reciclado e esta adição deveria ser feita durante a mistura.

MONTERO & LASERNA (2017) avaliaram a influência de dois métodos para considerar o volume total da água de mistura na dosagem e nas propriedades de concretos reciclados. No primeiro método, os autores optaram por manter o volume total de água constante entre as misturas, enquanto no segundo método, o volume de água efetiva, ou seja, a água livre presente na mistura era mantido constante. Para os autores, o volume de água efetivo é o parâmetro chave para controlar a consistência do concreto reciclado no estado fresco e métodos precisos para determinar a umidade inicial e a absorção de água dos agregados devem ser utilizados para garantir que o fator água/cimento efetivo seja mantido constante entre as misturas.

Outro fator que pode afetar o comportamento dos concretos produzidos com agregados reciclados é o método de dosagem utilizado. Em geral, ele considera apenas duas propriedades dos agregados reciclados: massa específica e absorção de água. Em grande parte dos estudos já citados, utiliza-se um método convencional para a dosagem de um concreto com agregados naturais, chamado de referência, e a partir daí, substitui-se em volume parte do agregado natural por reciclado, compensando a absorção de água do agregado. Acredita-se que este método de substituição influencia negativamente nas propriedades do concreto reciclado, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

BAIRAGI *et al.* (1990) desenvolveram uma relação empírica para modificar a relação agregado/cimento obtida pelo método do ACI para a dosagem de concretos reciclados com resistência à compressão entre 15 e 30 MPa. FATHIFAZL *et al.* (2009) propôs o método do Volume Equivalente de Argamassa. Esse método é baseado no fato que o agregado reciclado de concreto é composto por argamassa aderida e agregado natural. Assim, esse método considera a quantidade de cada uma dessas fases e ajusta a quantidade de agregado graúdo e argamassa do novo concreto para atingir o mesmo volume de argamassa de uma mistura feita totalmente com agregados naturais. DESHPANDE *et al.* (2014) demonstrou que, através da técnica de Rede Neural Artificial, era possível prever a resistência à compressão de concretos reciclados aos 28 dias. PEPE (2015) propôs um modelo conceitual para a previsão da resistência à compressão de concretos reciclados. Esse modelo considera que a grande porosidade do agregado reciclado de concreto influencia na água livre disponível para a mistura, e conseqüentemente na evolução da resistência à compressão ao longo do tempo. Os resultados obtidos pelo autor mostram que esse modelo é adequado para prever o

desenvolvimento da resistência à compressão a partir de um parâmetro chave para a caracterização de agregados reciclados, isto é, a capacidade de absorção de água.

Em estudos realizados por AMARIO (2015) e RANGEL (2015) foi utilizado um método de dosagem científica conhecido como Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) desenvolvido por DE LARRARD (1999). A principal vantagem deste método de dosagem é a possibilidade de considerar, individualmente, diferentes propriedades dos materiais constituintes e determinar as propriedades desejadas para o concreto. Assim, as autoras obtiveram resultados de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral para concretos reciclados de diferentes classes de resistência semelhantes aos de concretos naturais, independente do teor de agregado reciclado utilizado.

### ***3.1.2. Principais propriedades de concretos reciclados***

No estado endurecido, muitas vezes a porosidade do agregado reciclado provoca uma redução na resistência do concreto. A zona de transição pasta/agregado é geralmente a região mais fraca do concreto, devido à sua maior porosidade e fissuras do que os agregados e a pasta de cimento endurecida (ZHANG *et al.*, 2015). Assim, a utilização de ARC em concretos resulta em mais zonas de transição que em concretos naturais, nas quais estão incluídas as zonas de transição argamassa aderida/agregado antigo e zonas de transição entre a argamassa antiga e a nova matriz de argamassa. Por esta razão, os mecanismos de ruptura dos concretos com agregados reciclados podem ser muito diferentes dos observados para concretos naturais. Isto dependerá de vários fatores ligados às zonas de transição que desempenham um importante papel na microestrutura do concreto (XIAO *et al.*, 2013).

Além disso, os resultados da literatura são bastante contraditórios em relação à resistência a compressão do concreto reciclado. Observou-se que o controle da trabalhabilidade através da compensação de água de absorção do agregado reciclado, quando realizada de forma inadequada, pode provocar reduções consideráveis de resistência à compressão, devido ao aumento do fator água/cimento efetivo da mistura (FOLINO & XARGAY, 2014; HANIF *et al.*, 2017). Por outro lado, a utilização de aditivos para o controle da trabalhabilidade sem a consideração de uma quantidade de água adicional provoca uma redução do fator água/cimento efetivo e, conseqüentemente, um aumento na resistência (GAYARRE *et al.*, 2014). A utilização

de agregados na condição seca e sem consideração de água adicional na mistura provoca redução considerável na resistência à compressão dos concretos reciclados causada principalmente pela redução na trabalhabilidade e moldabilidade da mistura no estado fresco, provocando uma maior inclusão de vazios no concreto (BRAND *et al.*, 2015).

A resistência à tração de concretos é geralmente obtida por métodos indiretos. Um dos métodos indiretos mais utilizados para a avaliação da resistência à tração é o ensaio de tração por compressão diametral. Esta propriedade depende de uma série de fatores como teor de agregados reciclados na mistura, fator água/cimento, método de mistura, tipo de cimento, idade de cura e qualidade do concreto de origem (KISKU *et al.*, 2017). Como esta propriedade é diretamente relacionada à resistência à compressão do concreto, seu comportamento é muito semelhante ao descrito anteriormente.

A durabilidade é a capacidade de concretos de suportar ações ambientais e reações químicas sem perdas consideráveis de desempenho e esta diretamente relacionada à porosidade do concreto. A maioria das pesquisas publicadas sobre o efeito da utilização de agregados reciclados na durabilidade de concretos tem se concentrado em ensaios de absorção de água e migração acelerada de soluções (DODDS *et al.*, 2017). O efeito negativo é geralmente associado à elevada absorção de água destes agregados. A utilização de 25% a 30% de agregados reciclados não provoca prejuízos significativos na durabilidade de concretos (LOTFY & AL-FAYEZ, 2015; BRAVO *et al.*, 2015; PEDRO *et al.*, 2014; SOMNA *et al.*, 2012). THOMAS *et al.* (2018) avaliaram a influência de três variáveis nas propriedades de concretos reciclados: fator água/cimento, quantidade de cimento e porcentagem de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados. Os resultados desse estudo mostraram que a durabilidade dos concretos reciclados diminui com o aumento da porcentagem de substituição de agregados na mistura, enquanto a durabilidade aumenta conforme a quantidade de cimento também aumenta na mistura. Contudo, concretos com até 25% de agregados reciclados podem ser utilizados em áreas de exposição consideradas “moderadas” pela ASTM C1202. Para GUO *et al.* (2018), a durabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados de resíduo de concreto é afetada, principalmente, pela argamassa aderida ao agregado, ou seja, quanto maior é a quantidade de argamassa aderida, maior é a porosidade e a absorção de água do concreto, provocando uma queda na durabilidade.



Portanto, torna-se evidente que uma dosagem criteriosa e adequada para concretos reciclados é fundamental para que os concretos desenvolvidos apresentem as propriedades desejadas. Dessa forma, essa parte do estudo visa aplicar uma metodologia científica para a dosagem e produção de concretos reciclados de resistência normal e alta resistência, além de avaliar as suas principais propriedades mecânicas e físicas.

## **3.2. *Materiais e métodos***

Nessa seção, inicialmente, é apresentada a caracterização dos materiais utilizados para compor os concretos reciclados. Parte dessa caracterização já foi apresentada no Capítulo 2. Em seguida, é descrita a metodologia empregada para a dosagem e produção dos concretos. Para a utilização do método de dosagem escolhido, foram realizados ensaios adicionais de caracterização dos agregados e do cimento. Os métodos e os resultados desses ensaios são apresentados na seção 3.2.2.1. Por fim, são descritos os métodos de ensaios utilizados para a caracterização física e mecânica dos concretos reciclados.

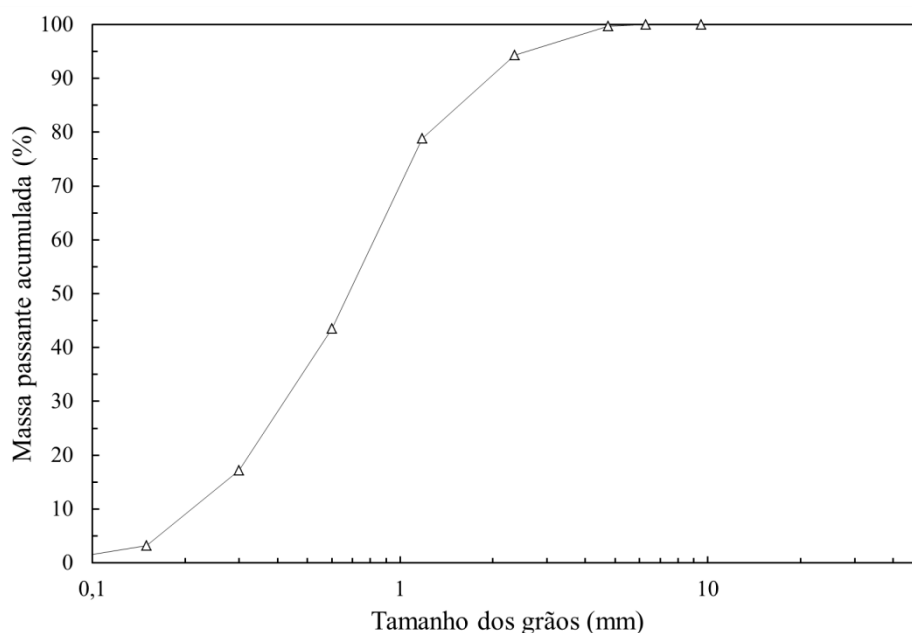
### **3.2.1. *Caracterização dos materiais***

Essa seção apresenta a caracterização dos materiais usados ao longo da pesquisa para a produção dos concretos reciclados.

#### **3.2.1.1. *Agregados***

Os agregados graúdos empregados nesse estudo já foram apresentados e caracterizados no Capítulo 2. Com exceção dos agregados provenientes do resíduo de uma usina de concreto (RCA\_C\_B1 e do RCA\_C\_B0), todos os outros foram utilizados para a produção de novos concretos.

Já o agregado miúdo utilizado foi uma areia natural quartzosa proveniente do Rio Guandu, no Rio de Janeiro, com dimensão máxima dos grãos de 4,75 mm. A composição granulométrica da areia é apresentada na Figura 3.1. Esse ensaio foi baseado nas prescrições da norma ABNT NBR NM 248 (2003).



**Figura 3.1 – Composição granulométrica do agregado miúdo natural**

As propriedades físicas do agregado miúdo são apresentadas na Tabela 3.1. A determinação da massa específica foi realizada de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR NM 52 (2009) e a absorção de total de água do agregado miúdo através das determinações da norma ABNT NBR NM 30 (2001).

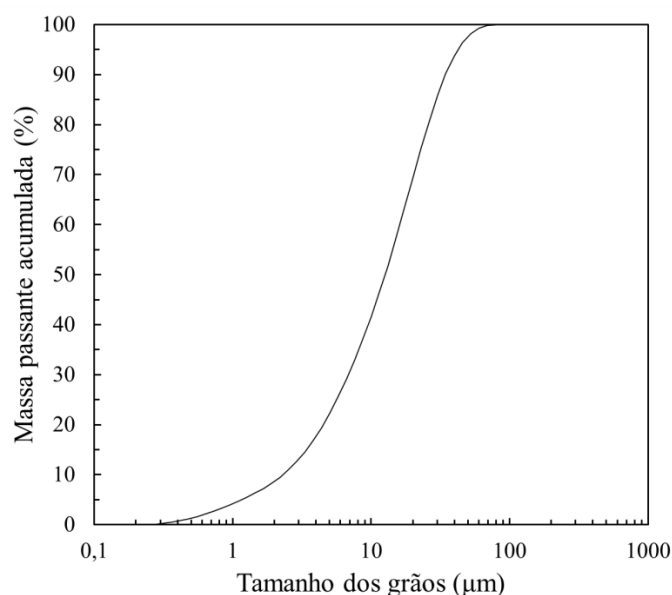
**Tabela 3.1 – Propriedades físicas do agregado miúdo**

Propriedade físicas – Areia natural	
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2447
Absorção total de água (%)	0,5

### 3.2.1.2. Cimento

Nessa pesquisa, foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI, produzido pelo grupo LafargeHolcim, proveniente de um único lote e em conformidade com a NBR 5733 (1991).

A composição granulométrica do cimento foi realizada através de análise a laser, em no equipamento *Malvern Mastersizer*. Neste ensaio, foi utilizado álcool etílico P.A. para evitar que as reações de hidratação do cimento interferissem no resultado da análise. A curva granulométrica do cimento é mostrada na Figura 3.2.



**Figura 3.2 – Granulometria do cimento Portland CPV-ARI**

Para a determinação da massa específica do cimento foi utilizado um picnômetro à gás (hélio), modelo *Accupyc* da *Micromeritics*. Para a composição química do cimento, foi utilizada a análise por espectrometria de fluorescência de raios X. Já o ensaio de perda ao fogo foi realizado de acordo a NBR NM 18 (2012), enquanto o ensaio de resistência à compressão do cimento Portland foi realizado em prensa *Shimadzu*, com base na NBR 7215 (1997). Todas essas propriedades são apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Propriedades do cimento Portland CPV-ARI**

Composição química (%)		Propriedade física	
CaO	63,6	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	3181
SiO <sub>2</sub>	19,2		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	
SO <sub>3</sub>	3,0	1 dia	22,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,9	3 dias	30,5
K <sub>2</sub> O	1,0	7 dias	35,2
SrO	0,4	28 dias	40,6
TiO <sub>2</sub>	0,3		
MnO	0,1		
<b>Perda ao fogo</b>	3,8		

Assim, o cimento possui massa específica igual a 3181 kg/m<sup>3</sup> e resistência à compressão aos 28 dias de 40,6 MPa.

### 3.2.1.3. *Superplastificante*

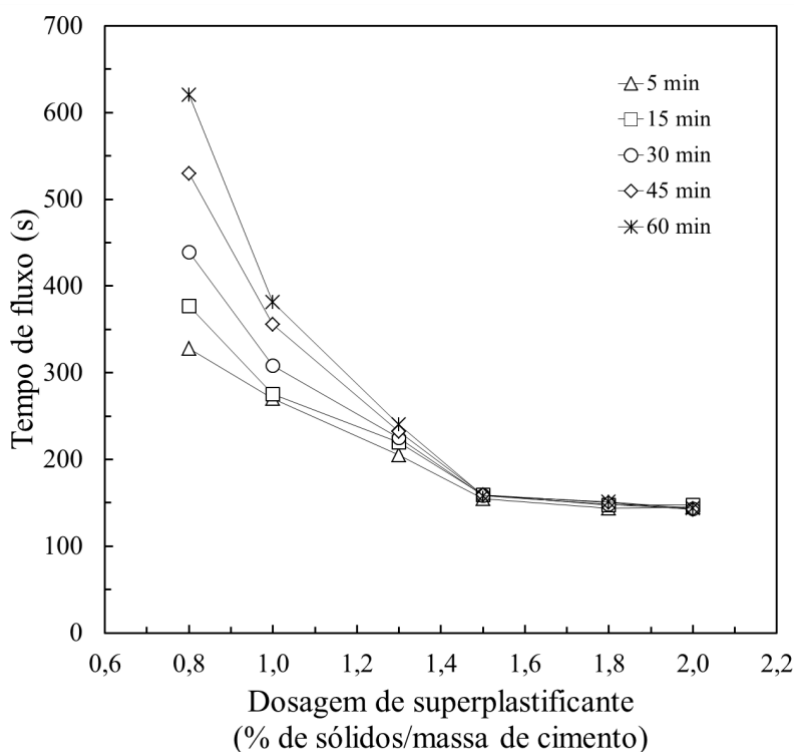
Neste estudo foi utilizado o aditivo superplastificante MC Powerflow 1180, com base em polímeros policarboxilatos, desenvolvido pela empresa *MC Bauchemie*. Este superplastificante requer tempos de misturas relativamente pequenos para que se atinja o seu máximo efeito plastificante (cerca de 8 minutos) e não prejudica a resistência inicial do concreto.

A massa específica do aditivo superplastificante foi calculada através da razão entre a massa de material equivalente a 50 cm<sup>3</sup> e este volume. Foi realizada a media de três determinações. O teor de sólidos foi medido através da secagem de duas amostras em estufa à 105°C ± 5°C até constância de massa. Ele foi calculado através da relação entre a massa final e a massa inicial das amostras. Para avaliar a compatibilidade entre o superplastificante e o cimento Portland e determinar a dosagem de saturação, foram realizados ensaios de escoamento de pastas de cimento através do funil de Marsh. A dosagem de saturação corresponde ao máximo grau de dispersão das partículas de cimento, provocado pelo superplastificante. A partir deste ponto, qualquer aumento no teor de aditivo químico não influenciará significativamente sobre a dispersão das partículas (DE LARRARD, 1999). As pastas foram produzidas com relação água/cimento de 0,30 e teores de superplastificante variando entre 0,8% e 2,0% de sólidos em relação à massa de cimento.

As propriedades do superplastificante são apresentadas na Tabela 3.3 e a curva de compatibilidade entre o cimento e o superplastificante é mostrada na Figura 3.3.

**Tabela 3.3 – Propriedades do aditivo superplastificante MC Powerflow 1180**

<b>Descrição</b>	<b>Propriedades</b>
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,07
<b>Teor de sólidos (%)</b>	35
<b>Dosagem de saturação (% sólidos do sp / massa de cimento)</b>	1,5
<b>Dosagem de saturação (% total de sp / massa de cimento)</b>	4,3



**Figura 3.3 – Curva de compatibilidade do aditivo superplastificante MC Powerflow 1180 com o cimento CPV-ARI**

O superplastificante apresenta teor de sólidos igual a 35% e sua densidade é 1,07 g/cm<sup>3</sup>. Através da análise do gráfico, nota-se que o cimento e o superplastificante são compatíveis entre si, pois as curvas dos tempos de leitura se aproximam umas das outras conforme o teor de aditivo é aumentado. Além disso, o ponto de saturação corresponde à dosagem de 1,5% de sólidos do superplastificante em relação à massa do cimento, visto que a partir deste valor, qualquer incremento no teor de aditivo não promove grandes alterações no tempo de fluxo.

### 3.2.2. Dosagem e composição das misturas

Inicialmente, é importante definir alguns termos que serão utilizados ao longo desse estudo. O termo água livre diz respeito à água disponível durante a mistura para garantir uma adequada trabalhabilidade ao concreto. Já a água de absorção é definida como a água que será absorvida durante o processo de mistura dos componentes do concreto. Esta água não é levada em consideração para o cálculo do volume de concreto, pois, ao final da mistura, estará no interior dos agregados. A água total adicionada à mistura, como o próprio nome indica, corresponde à água incluída ao misturador durante o

processo de mistura e corresponde a soma da água livre com a água de absorção dos agregados.

A água de absorção para os agregados reciclados a ser considerada ao longo deste estudo foi equivalente a 50% da absorção total de água após 24 horas. Essa estimativa é baseada em estudos realizados por AMARIO (2015) e PEPE *et al.* (2016), onde foi observado que os agregados reciclados, tanto da classe brita 0 quanto brita 1, são capazes de absorver durante o processo de mistura, uma quantidade de água equivalente a cerca de 50% da sua absorção total.

Uma grande barreira na dosagem de concretos reciclados é a inexistência de um método específico para materiais reciclados que leve em consideração as diferentes propriedades destes agregados. Em geral, utiliza-se um método convencional para a dosagem de um concreto com agregados naturais, chamado de referência, e a partir daí, substitui-se em volume parte do agregado natural por reciclado, compensando a absorção de água do agregado. Esse método de substituição pode influenciar negativamente as propriedades do concreto reciclado, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, pois considera apenas a massa específica e a absorção de água dos agregados. Assim, no presente estudo, optou-se pela dosagem dos concretos reciclados utilizando-se os conceitos do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), método de dosagem científica desenvolvido por DE LARRARD (1999). A principal vantagem deste método de dosagem é a possibilidade de considerar, individualmente, diferentes propriedades dos materiais constituintes e determinar as propriedades desejadas para o concreto. Esse método já foi utilizado em estudos anteriores (AMARIO *et al.*, 2017; RANGEL *et al.*, 2017) e foi considerado bastante adequado para a dosagem de concretos reciclados, onde foi possível desenvolver concretos contendo agregados reciclados de resíduos de concreto com a mesma resistência à compressão de concretos contendo somente agregados naturais, tanto para resistência normal quanto para alta resistência.

#### 3.2.2.1. *Parâmetros para a aplicação do Modelo de Empacotamento Compressível*

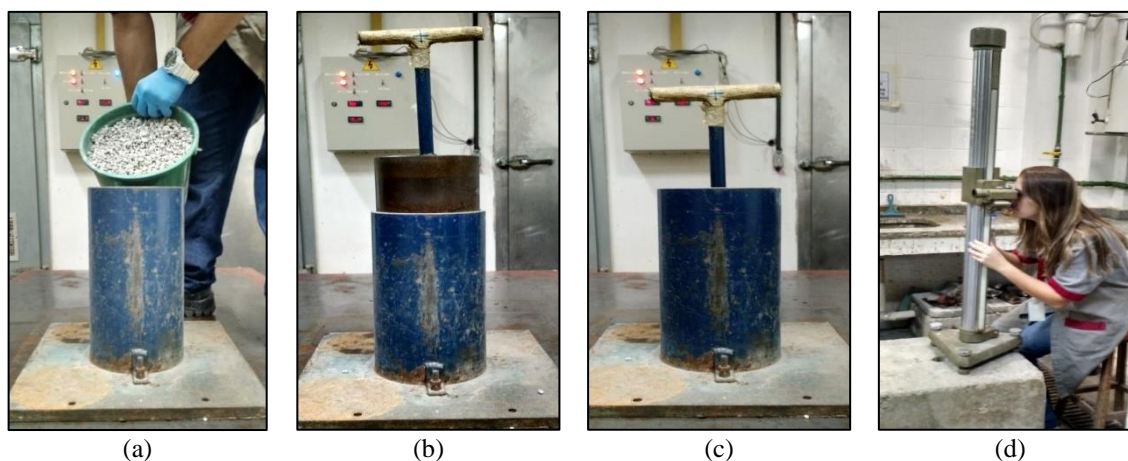
Para a aplicação do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) é imprescindível a realização de dois procedimentos experimentais desenvolvidos por DE LARRARD (1999): um para a determinação da compacidade experimental dos materiais utilizados e outro para a calibração de dois parâmetros de resistência à compressão relacionados aos

agregados. A compactidade experimental é determinada através de dois métodos, um para agregados e outro para cimento.

Todos esses procedimentos e os resultados obtidos são apresentados nos itens a seguir.

#### 3.2.2.1.1. Compactidade experimental - Ensaio de Compactação Mecânica e Vibração

O ensaio de compactação mecânica e vibração é utilizado para determinar a compactidade experimental de partículas maiores que 100  $\mu\text{m}$ . Este ensaio consiste em medir a altura da camada de material após a compactação. Para isso, utiliza-se um volume padrão de material em um cilindro metálico preso a uma mesa vibratória e aplica-se uma pressão através de um pistão maciço. Após a colocação do pistão, aciona-se a mesa vibratória com frequência constante, por um período de 3 minutos. O procedimento mais detalhado deste ensaio foi descrito por AMARIO (2015). As principais etapas deste ensaio são mostradas na Figura 3.4.



**Figura 3.4 – Etapas do ensaio de compactação mecânica e vibração: (a) colocação do material no molde; (b) posição do pistão antes da vibração; (c) posição do pistão após a vibração; (d) leitura da posição do pistão, através do catetômetro.**

Visando a obtenção de um resultado mais preciso, os agregados foram separados em três diferentes classes de tamanhos e a compactidade foi determinada através de três repetições para cada classe. O tamanho dos grãos de cada classe é apresentado na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 – Tamanho dos grãos de cada classe para ensaio de compacidade experimental**

<b>Agregado</b>	<b>Classe</b>	<b>Tamanho dos grãos</b>
<b>Agregado miúdo Areia - Natural (0,15 a 4,75 mm)</b>	Classe 1	0,15 a 0,4 mm
	Classe 2	0,4 a 0,8 mm
	Classe 3	0,8 a 4,75 mm
<b>Agregado graúdo Brita 0 - Natural e Recicladas (4,75 a 9,5 mm)</b>	Classe 1	4,75 a 5,6 mm
	Classe 2	5,6 a 7,93 mm
	Classe 3	7,93 a 9,5 mm
<b>Agregado graúdo Brita 1 – Natural e Recicladas (9,5 a 19 mm)</b>	Classe 1	9,5 a 12,5 mm
	Classe 2	12,5 a 16,0 mm
	Classe 3	16,0 a 19,0 mm

Os resultados de compacidade experimental para todos os agregados que foram utilizados para a composição dos concretos reciclados são apresentados na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5 – Valores de compacidade experimental dos agregados**

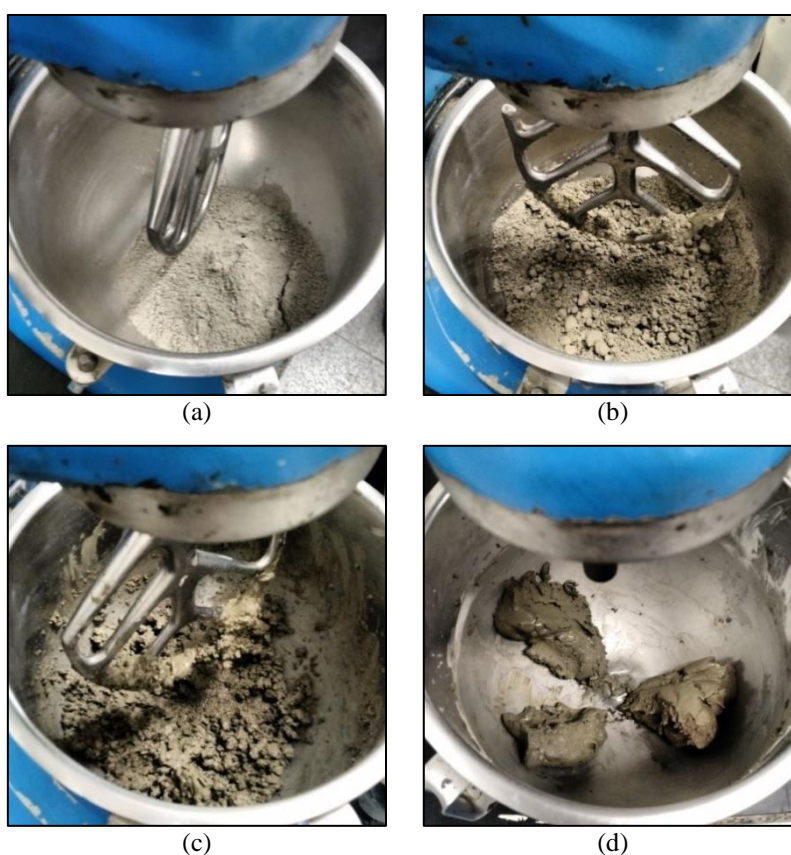
<b>Materiais</b>	<b>Compacidade experimental</b>			
	<b>Classe 1</b>	<b>Classe 2</b>	<b>Classe 3</b>	
<b>Areia</b>	0,699	0,520	0,683	
<b>BRITA 0</b>	<b>Nat_B0</b>	0,677	0,542	0,553
	<b>RCA_L_B0</b>	0,663	0,604	0,604
	<b>RCA_D_B0</b>	0,570	0,552	0,574
<b>BRITA 1</b>	<b>Nat_B1</b>	0,603	0,557	0,539
	<b>RCA_L_B1</b>	0,564	0,552	0,603
	<b>RCA_D_B1</b>	0,572	0,572	0,576

Nota-se, de uma forma geral, que apesar de muito próximos, os valores de compacidade experimental dos agregados de classe granulométrica brita 0 apresentam um empacotamento maior que os agregados de brita 1. Isso pode ser explicado pela melhor distribuição granulométrica e a maior presença de finos que fazem com que o arranjo dos grãos seja mais compacto.



### 3.2.2.1.2. Compacidade experimental - Ensaio de demanda d'água

O ensaio de demanda d'água foi utilizado para determinar a compacidade experimental do cimento Portland, segundo procedimento descrito por DE LARRARD (1999). Este ensaio consiste em adicionar progressivamente uma quantidade de água ao material até que sejam observadas quatro diferentes fases: estado seco (Figura 3.5-a); estado pendular (Figura 3.5-b); estado funicular (Figura 3.5-c) e estado capilar (Figura 3.5-d). Esta última fase é onde a pasta de cimento apresenta o máximo empacotamento de partículas. A partir deste ponto, qualquer adição de água à mistura provocará o afastamento das partículas, reduzindo a compacidade e aumentando a fluidez.



**Figura 3.5 – Etapas do ensaio de demanda d'água: (a) estado seco; (b) estado pendular; (c) estado funicular; (d) estado capilar**

Para a realização deste ensaio, é necessário um misturador planetário de 2 litros de capacidade. Inicialmente, adiciona-se uma pequena quantidade de água a 350 g de cimento, com o misturador na velocidade baixa por 1 minuto. Posteriormente, novas adições sucessivas de água são feitas e mantidas por 1 minuto em velocidade alta, até que se observe o estado capilar, caracterizado por uma pasta homogênea e sem umidade na parede do misturador. O tempo médio de ensaio foi de 10 minutos e foram realizadas

quatro determinações para o cálculo da média de água necessária para o ponto de demanda d'água. Este ensaio foi realizado em pastas produzidas com aditivo superplastificante, onde a dosagem de superplastificante utilizada foi determinada através do ensaio de ponto de saturação.

Dessa forma, o valor obtido para o ensaio de compacidade experimental do cimento, através do método de demanda d'água foi de 0,67.

#### 3.2.2.1.3. Calibração dos parâmetros “p” e “q”

Além do ensaio de compacidade experimental, é necessário calibrar dois parâmetros de resistência à compressão relacionados aos agregados. O parâmetro “p” trata da interface pasta-agregado, enquanto o parâmetro “q” está relacionado à resistência intrínseca do agregado. Sabendo-se que a calibração leva em consideração os grãos de maior dimensão da mistura, foram produzidas argamassas para calibração dos parâmetros da areia natural (dimensão máxima 4,75 mm) e concretos para a calibração dos agregados graúdos (dimensão máxima de 9,5 mm para calibração das britas 0 e dimensão máxima de 19 mm para calibração das britas 1). Foram definidas duas misturas para a calibração de cada um dos agregados, sendo uma de alta resistência (Traço Rico - TR) e outra de baixa resistência (Traço Pobre - TP).

Para avaliação da resistência à compressão dos concretos produzidos foram moldados corpos de prova de 7,5 cm de diâmetro por 15 cm de altura. As argamassas foram moldadas em corpos de prova de 5,0 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Todas as misturas foram ensaiadas à compressão em prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F1000kN, com base nas prescrições da NBR 5739 (2007), com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min. As idades de ensaio adotadas foram 1, 3, 7 e 28 dias para todas as misturas.

É importante destacar que a composição das misturas ricas e pobres em cimento são diferentes para cada um dos agregados, então é incoerente comparar os valores de resistência à compressão obtidos nesta calibração para estes materiais. Portanto, com base na composição das misturas e nos resultados de resistência à compressão, foi utilizada a ferramenta computacional *Betonlab Pro 3* para a obtenção dos valores de “p” e “q”. Esses valores são apresentados na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6 – Calibração dos parâmetros “p” e “q”**

	<b>Materiais</b>	<b>p</b>	<b>q</b> (MPa <sup>-1</sup> )
	<b>Areia</b>	0,982	0
<b>BRITA 0</b>	<b>Nat_B0</b>	1,9867	0,00102
	<b>RCA_L_B0</b>	1,4121	0
	<b>RCA_D_B0</b>	0,8676	0
<b>BRITA 1</b>	<b>Nat_B1</b>	1,9846	0
	<b>RCA_L_B1</b>	1,3837	0
	<b>RCA_D_B1</b>	0,9435	0

AMARIO (2015) realizou uma análise para verificar a influência dos parâmetros “p” e “q” na resistência à compressão de concretos. Conforme observado por AMARIO (2015), quanto maior o valor obtido para o parâmetro “p”, para um mesmo valor de “q”, maior é resistência à compressão esperada aos 28 dias. Isto mostra que o parâmetro “p” exerce forte influência na resistência dos concretos. Já para o parâmetro “q”, a relação com a resistência é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o valor de “q”, menor é a resistência. Além disso, o parâmetro “q” não mostrou tanta influência na resistência como o parâmetro “p”. Assim, foi observado que a resistência à compressão é muito mais influenciada pela interface agregado-pasta, do que da resistência intrínseca do próprio agregado.

Com base nos resultados obtidos, é possível notar que os agregados naturais apresentaram os maiores valores de “p”. Além disso, também foi observado que os valores de “p” estão muito relacionados à origem dos agregados. Este fato é bem coerente já que este parâmetro está ligado à interface agregado-pasta.

### 3.2.2.2. *Composição das misturas*

As dosagens de concretos, baseadas no Modelo de Empacotamento Compressível, foram realizadas com o auxílio do programa *Betonlab Pro 3*. Neste programa, é possível otimizar traços de concretos e estimar algumas propriedades da mistura nos estados fresco e endurecido, a partir de um banco de dados das matérias primas, criado pelo próprio usuário. O programa faz simulações a partir de um traço inicial, definido pelo usuário, e realiza otimizações automáticas, de acordo com propriedades pré-

estabelecidas. Deste modo, é possível restringir a faixa de abatimento do tronco de cone, definir uma resistência esperada aos 28 dias, determinar a quantidade mínima desejada para um dado material, entre outras especificações desejadas. Além disso, o usuário precisa escolher qual propriedade deve ser maximizada ou minimizada, como exemplo, a compacidade da estrutura granular, a resistência mecânica em uma determinada idade ou, até mesmo, o consumo de cimento.

Nesse estudo, foram desenvolvidas misturas de concreto de duas classes de resistência à compressão, uma de resistência normal (35 MPa) e outra de alta resistência (60 MPa). Além disso, foram produzidas misturas com 100% de agregados reciclados em cada uma das frações granulométricas separadamente, ou seja, misturas onde 100% da fração brita 1 ou 100% da fração brita 0 eram de origem reciclada. A fim de comparação, também foram produzidas misturas de referência compostas integralmente por agregados naturais. Conforme explicado anteriormente, somente os agregados provenientes de resíduos de concreto produzidos em laboratório e de usina de reciclagem de material de demolição foram utilizados para a composição de concretos desse estudo.

O teor de aditivo superplastificante utilizado foi de 0,2% e 1,5% da massa de sólidos do aditivo em relação ao consumo de cimento para as classes C35 e C60, respectivamente. Esses valores foram escolhidos visando obter misturas com a mesma faixa de trabalhabilidade, ou seja, valores de abatimento de tronco de cone de  $180 \pm 20$  mm.

É importante destacar que, como o objetivo do estudo era avaliar o comportamento de misturas de concreto com a mesma resistência à compressão aos 28 dias para cada classe de resistência, o consumo de cimento é ligeiramente diferente entre cada mistura. Porém, essa diferença é menor que 5% para a classe C35 e menor que 3% para a classe C60.

As composições das misturas de concreto são apresentadas na Tabela 3.7. Na sigla escolhida para nomear as misturas de concreto, o “CXX” indica a classe de resistência das misturas, onde “XX” pode ser 35 MPa ou 60 MPa. Em seguida, é representada a origem do material, ou seja, “NAT” para agregados de origem natural, “L” para agregados reciclados produzidos em laboratório e “D” para agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto da usina de reciclagem de materiais de demolição. Adicionalmente, nas misturas contendo agregados reciclados, incluiu-se a sigla “B0” ou

“B1” para indicar em quais misturas há a presença de 100% do agregado reciclado na fração Brita 0 ou na fração Brita 1, respectivamente.

A quantidade de água apresentada na Tabela 3.7 corresponde à água total adicionada à mistura. Ela representa a soma da quantidade de água livre necessária para obter a trabalhabilidade desejada e a quantidade de água adicional (água de absorção) para que os agregados absorvessem durante o processo de mistura.

**Tabela 3.7 – Composição das misturas de concreto**

Misturas	Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )		Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )		Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	
	NAT	RCA	NAT	RCA					
<b>C35-NAT</b>	452	0	457	0	868	325	212	1,86	
<b>Classe C35</b>	<b>C35-L-B0</b>	451	0	0	373	866	338	217	1,93
	<b>C35-L-B1</b>	0	361	456	0	867	336	216	1,92
	<b>C35-D-B0</b>	451	0	0	371	866	345	214	1,97
	<b>C35-D-B1</b>	0	384	453	0	862	341	216	1,95
	<b>C60-NAT</b>	448	0	452	0	860	448	150	19,2
<b>Classe C60</b>	<b>C60-L-B0</b>	448	0	0	371	861	458	152	19,6
	<b>C60-L-B1</b>	0	356	450	0	856	461	151	19,8
	<b>C60-D-B0</b>	448	0	0	369	860	464	145	19,9
	<b>C60-D-B1</b>	0	382	451	0	857	463	147	19,8

A Tabela 3.8 apresenta dados adicionais sobre a composição das misturas. Esses dados foram utilizados ao longo do estudo para estabelecer relações entre as propriedades dos concretos e compreender melhor o seu comportamento. Conforme explicado anteriormente, a água livre refere-se à água disponível durante a mistura para garantir uma adequada trabalhabilidade ao concreto. Deste modo, o fator água/cimento efetivo representa a relação entre a água livre e a quantidade total de cimento. Já o teor de pasta efetiva indica a porcentagem equivalente aos volumes de cimento, superplastificante e da água livre de cada mistura. Por fim, o volume total de argamassa representa a soma do volume de argamassa envelhecida aderida aos grãos de agregados reciclados e do volume de argamassa (isto é, agregado miúdo mais pasta efetiva) de cada concreto. Para os concretos que contem apenas agregados naturais (C35-NAT e C60-NAT), esse

volume é equivalente ao volume de argamassa da mistura, ou seja, volume total menos o volume representado pelos agregados graúdos.

**Tabela 3.8 – Dados adicionais da composição das misturas**

	Misturas	Água livre (kg/m <sup>3</sup> )	Fator a/c efetivo	Teor de pasta efetiva (%)	Volume total de argamassa (%)
<b>Classe C35</b>	<b>C35-NAT</b>	196	0,60	30,0	65,5
	<b>C35-L-B0</b>	194	0,57	30,2	74,9
	<b>C35-L-B1</b>	191	0,57	29,9	77,6
	<b>C35-D-B0</b>	191	0,55	30,1	75,1
	<b>C35-D-B1</b>	194	0,57	30,3	73,1
<b>Classe C60</b>	<b>C60-NAT</b>	145	0,32	30,4	65,5
	<b>C60-L-B0</b>	141	0,31	30,4	74,8
	<b>C60-L-B1</b>	138	0,30	30,1	77,3
	<b>C60-D-B0</b>	134	0,29	29,9	74,6
	<b>C60-D-B1</b>	137	0,30	30,1	72,7

### **3.2.3. Produção, moldagem e cura dos concretos**

Os concretos foram produzidos em misturador do tipo betoneira com capacidade para 120 litros, do fabricante GMEG – MOTOMIL.

Inicialmente, o misturador foi umedecido com água e o excesso de água foi retirado com o auxílio de um pano úmido. Em seguida, o processo de mistura foi iniciado com a colocação dos agregados, na ordem brita 1, brita 0 e depois areia, de forma a evitar que este último ficasse aderido as paredes do misturador. Estes materiais foram misturados por um minuto para que fosse possível obter uma boa homogeneização. Após este tempo, 50% da água total da mistura foi adicionada aos agregados, misturando-se estes materiais por mais um minuto. Em seguida, o cimento foi adicionado e o misturador acionado por mais um minuto. Por fim, o superplastificante foi adicionado juntamente com o restante da água e misturados por mais 8 minutos, que é o tempo mínimo necessário para a ação total do superplastificante. O tempo total de mistura, a partir do momento em que a água foi adicionada, foi de 10 minutos.

Para a moldagem dos corpos de prova, ao final do procedimento de mistura, o concreto foi adensado mecanicamente em mesa vibratória (68 Hz), sendo colocado nos moldes em duas camadas. O tempo de vibração foi de aproximadamente 30 segundos para cada camada.

Os corpos de prova foram mantidos nos moldes por 24 horas, protegidos da perda de umidade. Durante todas as etapas de mistura, moldagem e ensaio de abatimento do tronco de cone, a temperatura da sala foi mantida constante e igual a  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Após a desmoldagem, os corpos de prova foram colocados em câmara úmida, com umidade relativa do ar de 100% e temperatura de  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , onde permaneceram até as idades programadas para os ensaios.

#### **3.2.4. Métodos de ensaios em concretos**

Nessa seção, são apresentados os métodos de ensaios utilizados para a caracterização dos concretos. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório NUMATS/COPPE/UFRJ.

##### **3.2.4.1. Abatimento de tronco de cone**

O ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams foi realizado de acordo com as prescrições da ABNT NBR NM 67 (1998). Esse ensaio consiste em compactar três camadas, com 25 golpes distribuídos uniformemente em cada um, utilizando uma haste de socamento. O molde é retirado cuidadosamente na direção vertical e é medido o abatimento do concreto.

##### **3.2.4.2. Resistência à compressão axial**

A resistência à compressão dos concretos foi avaliada através da ruptura de corpos-de-prova cilíndricos (75 mm de diâmetro e 150 mm de altura) em prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F1000kN, de acordo com as determinações da ABNT NBR 5739 (2007). Os corpos de prova tiveram suas extremidades regularizadas através de faceamento em torno mecânico para garantir a planicidade das bases. Além da carga de ruptura, o comportamento tensão *versus* deformação foi obtido com o emprego de transdutores elétricos (LVDT) para a medição dos deslocamentos longitudinais, conectados à região central dos corpos-de-prova. A velocidade de carregamento foi de

0,1 mm/min e os sinais de força e deslocamento foram registrados por um sistema de aquisição de dados. Através da curva tensão versus deformação foi possível calcular o módulo de elasticidade, de acordo com a ABNT NBR 8522 (2008).

#### *3.2.4.3. Resistência à tração por compressão diametral*

O ensaio de tração por compressão diametral consiste na aplicação de um carregamento compressivo ao longo de duas geratrizes situadas em um mesmo plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico. Este ensaio foi realizado em prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F1000kN, de acordo com as prescrições da ABNT NBR 7222 (2011). A resistência à tração foi determinada em quatro corpos-de-prova cilíndricos de 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura e a velocidade de carregamento adotada foi 0,3 mm/min.

#### *3.2.4.4. Absorção total, índice de vazios e massa específica*

O ensaio de absorção total, índice de vazios e massa específica foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 9778 (2005). Foram ensaiados três corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) para cada mistura, com idade de 28 dias. Os corpos-de-prova foram secos em estufa mantida em temperatura constante e igual a  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  até atingirem constância de massa. Vale ressaltar que o índice de vazios está associado ao volume total de poros acessíveis à água e não demonstra a facilidade com a qual a água pode penetrar no concreto (permeabilidade).

### ***3.3. Apresentação e análise dos resultados***

Essa seção apresenta os resultados da caracterização experimental dos concretos reciclados produzidos nesse estudo. As propriedades físicas e mecânicas apresentadas nesse capítulo fazem parte de uma caracterização inicial desses concretos. As propriedades reológicas, de hidratação e de longa duração serão mostradas ao longo dos próximos capítulos.



### 3.3.1. *Abatimento de tronco de cone*

Os resultados de abatimento de tronco de cone são apresentados na Tabela 3.9. Nela, é possível observar que todas as misturas se mantiveram na faixa de abatimento de tronco de cone desejada, ou seja, entre 160 e 200 mm.

Além disso, a fonte de origem e a fração granulométrica dos agregados reciclados não tiveram influência na trabalhabilidade dos concretos. Isso mostra que o método de dosagem e de compensação de água utilizados foram adequados para as misturas de concretos reciclados desse estudo.

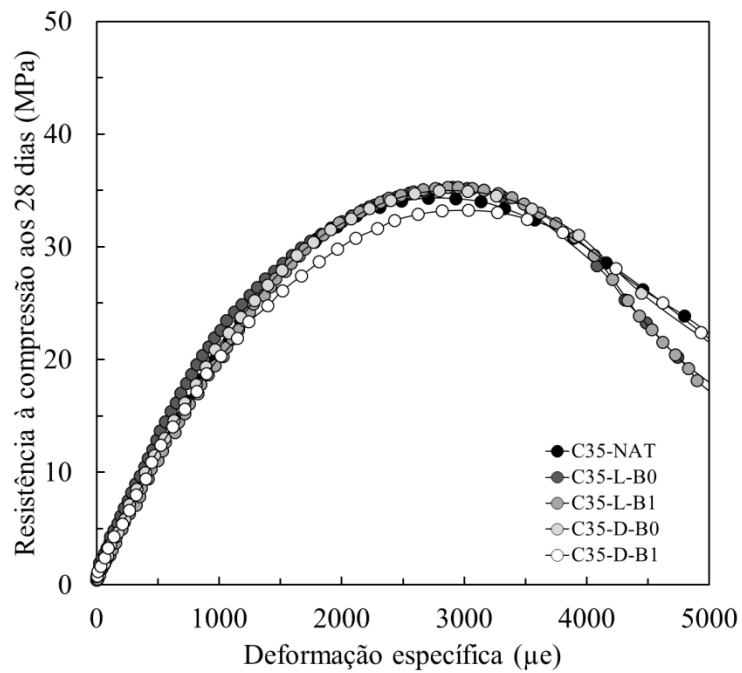
Mais detalhes sobre as propriedades dos concretos no estado fresco serão apresentadas no Capítulo 4.

**Tabela 3.9 – Resultados de abatimento de tronco de cone para os concretos**

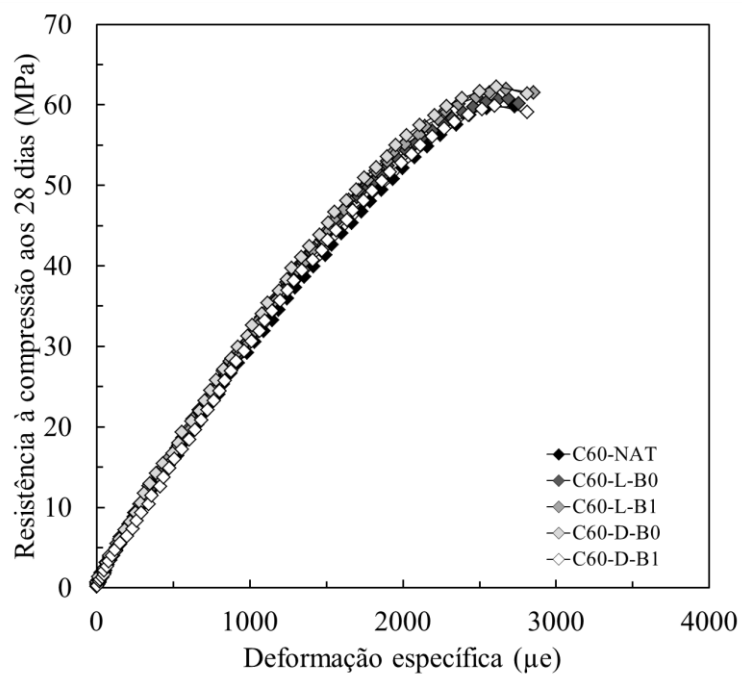
<b>Misturas</b>	<b>Abatimento de tronco de cone (mm)</b>
<b>C35-NAT</b>	175
<b>C35-L-B0</b>	180
<b>C35-L-B1</b>	165
<b>C35-D-B0</b>	165
<b>C35-D-B1</b>	195
<b>C60-NAT</b>	165
<b>C60-L-B0</b>	180
<b>C60-L-B1</b>	170
<b>C60-D-B0</b>	165
<b>C60-D-B1</b>	160

### 3.3.2. *Propriedades mecânicas - Resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral*

As curvas típicas de tensão *versus* deformação axial sob esforços de compressão axial aos 28 dias para as classes C35 e C60 são apresentadas na Figura 3.6.



(a)



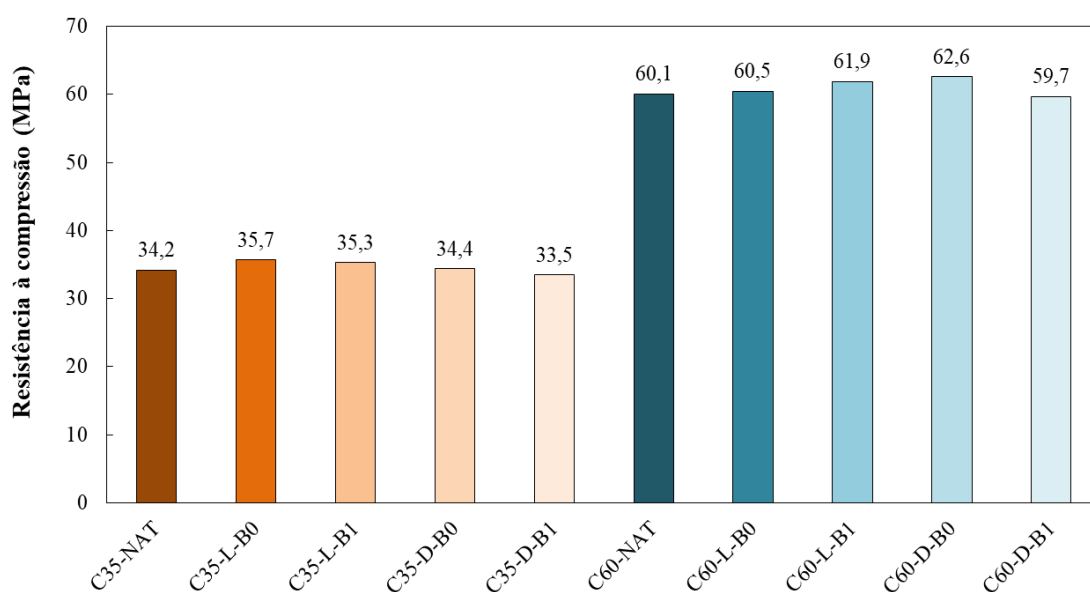
(b)

**Figura 3.6 – Curvas típicas de tensão *versus* deformação axial aos 28 dias para os concretos: (a) classe C35 e (b) classe C60**

Através da análise das curvas típicas, é possível notar que todas as misturas da classe C35 apresentaram um comportamento semelhante no ramo ascendente, enquanto no ramo descendente, as misturas produzidas com agregados provenientes do resíduo de laboratório (C35-L-B0 e C35-L-B1) apresentaram uma menor capacidade de suportar a carga aplicada após atingir a tensão de pico. Nesse sentido, as misturas contendo

agregados reciclados produzidos a partir do resíduo de demolição tiveram um comportamento mais semelhante ao da mistura de referência na classe de resistência normal. Já para as misturas de alta resistência, todas apresentaram um comportamento similar entre si. Além disso, diferentemente das misturas da classe C35, as misturas da classe C60 não exibiram uma resistência residual após a tensão de pico, apresentando, assim, uma ruptura frágil.

Os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias são mostrados na Figura 3.7.



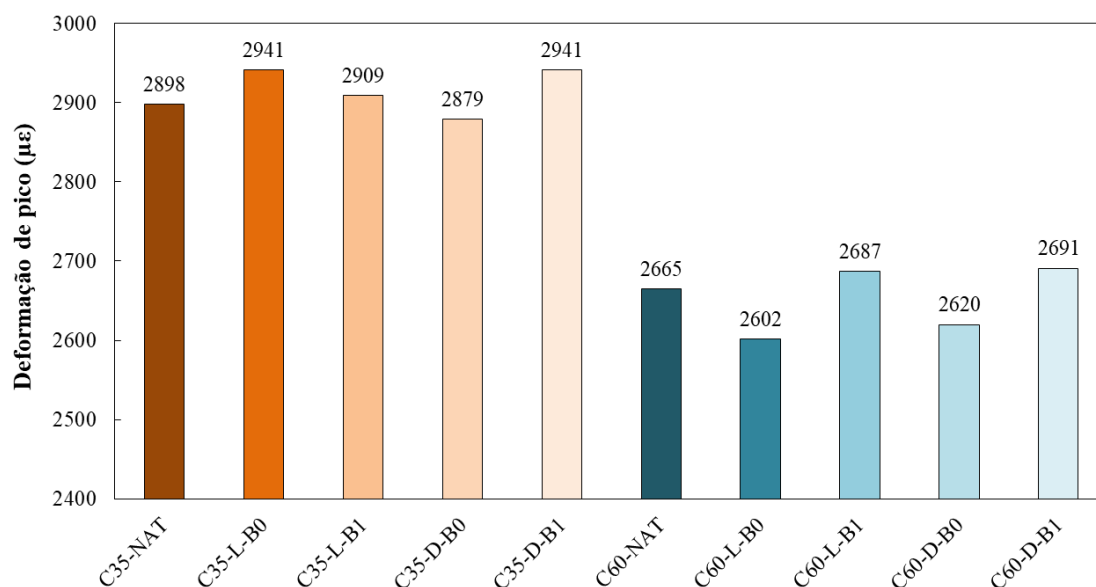
**Figura 3.7 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos de resistência normal e de alta resistência**

Esses resultados demonstram que o método de dosagem científica utilizado pode ser considerado adequado para produzir concretos com a resistência desejada. De fato, o erro entre a resistência à compressão prevista e a resistência à compressão obtida experimentalmente foi inferior a 5%, tanto para as misturas de resistência normal quanto para as de alta resistência. Além disso, a origem e a dimensão máxima do agregado reciclado utilizado não influenciaram na exatidão do método de dosagem adotado. Assim, pode-se afirmar que o Modelo de Empacotamento Compressível pode ser utilizado, com grande precisão para a dosagem de concretos reciclados.

Com base nos resultados de resistência à compressão da classe C35, pode-se afirmar que os agregados provenientes do resíduo de laboratório apresentaram resultados ligeiramente maiores de resistência à compressão quando comparados com os resultados das misturas produzidas com resíduo de demolição. Isso pode ser explicado pela

presença de uma argamassa aderida de maior qualidade, além da maior angularidade da superfície dos grãos dos agregados reciclados produzidos a partir do resíduo de laboratório, que pode ter melhorado a interface entre a pasta e o agregado. De fato, os agregados RCA\_L\_B0 e RCA\_L\_B1 apresentaram maiores valores de “p” na calibração dos parâmetros de resistência do Modelo de Empacotamento Compressível. Para as misturas da classe C60, a matriz cimentícia é a maior responsável pela resistência do concreto, assim, nessa classe de resistência, a origem do resíduo dos agregados reciclados não influenciou o comportamento das misturas.

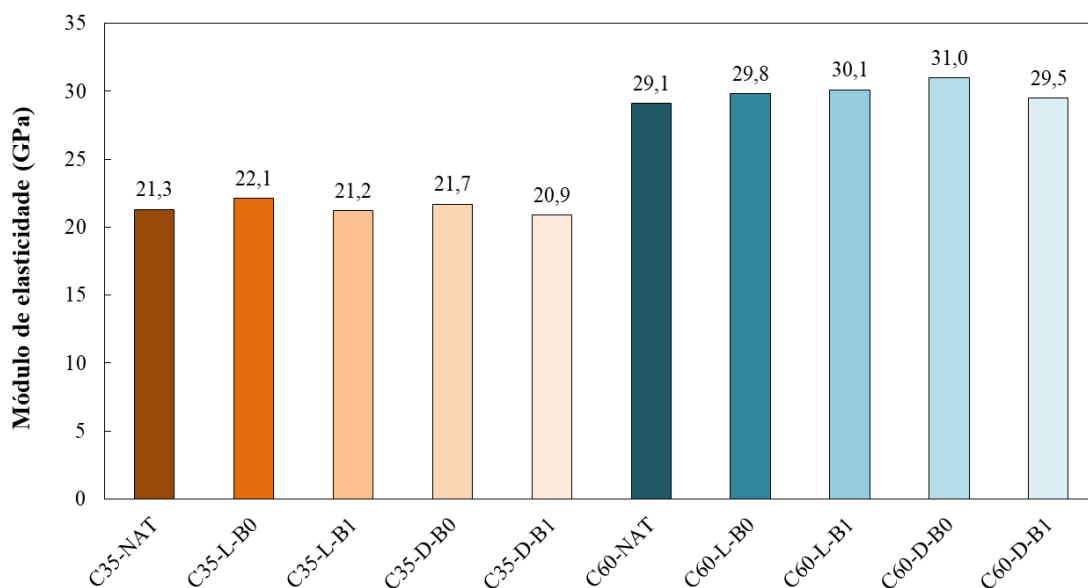
Os resultados de deformação de pico obtidos através do ensaio de resistência à compressão são apresentados na Figura 3.8.



**Figura 3.8 – Valores de deformação de pico do ensaio de resistência à compressão dos concretos de resistência normal e de alta resistência**

Os resultados mostraram que as misturas da classe C35 atingiram maiores deformações na região imediatamente anterior à ruptura do que as misturas da classe C60, porém a presença de agregados reciclados nos concretos não teve influência nesses valores em comparação com as misturas de referência (C35-NAT e C60-NAT). Além disso, a origem do resíduo e a fração granulométrica (brita 0 ou brita 1) de agregados reciclados utilizados também não influenciaram nos resultados de deformação de pico.

Os resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias obtidos através do ensaio de resistência à compressão são apresentados na Figura 3.9.

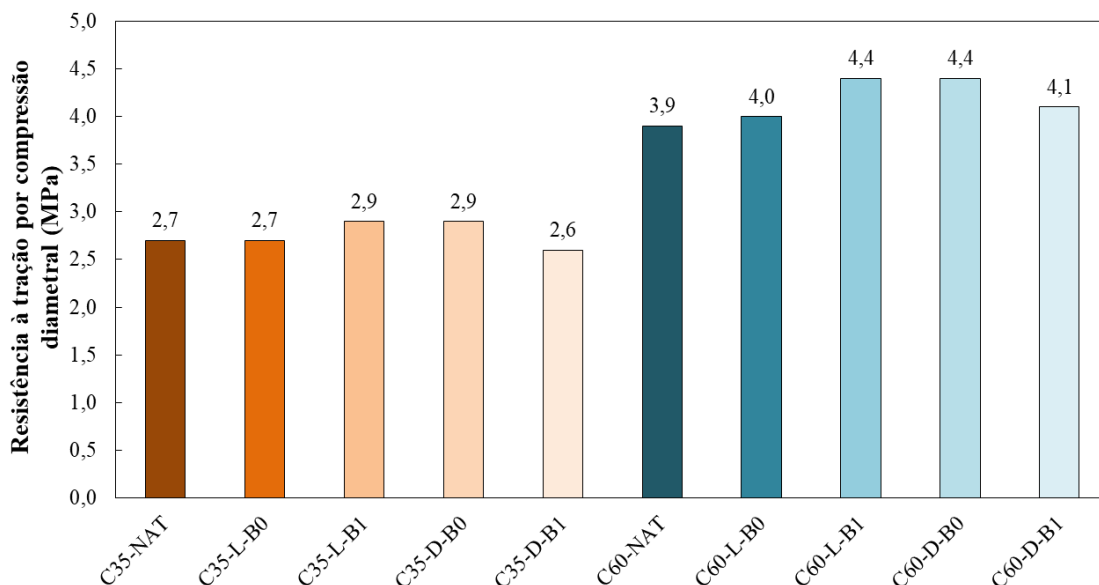


**Figura 3.9 – Resultados de módulo de elasticidade dos concretos de resistência normal e de alta resistência**

Em relação a esses resultados, nota-se que tanto as misturas da classe C35 quanto as misturas da classe C60 apresentaram valores bastante similares dentro de sua respectiva classe. Apesar disso, assim como ocorreu com os resultados de resistência à compressão, as misturas C35-L-B0 e C35-L-B1 apresentaram valores de módulo de elasticidade ligeiramente maiores que as misturas C35-D-B0 e C35-D-B1, respectivamente. Porém, para a classe C60, a origem do resíduo e a fração granulométrica dos agregados reciclados utilizados não influenciaram nessa propriedade. Portanto, as variações nos valores de módulos de elasticidade estão mais relacionadas às variações nos valores de resistência à compressão do que pela presença, origem e fração granulométrica dos agregados reciclados.

Por fim, os resultados de resistência à tração por compressão diametral são mostrados na Figura 3.10. Eles indicam que as misturas da classe C35 apresentaram menores valores de resistência à tração que as misturas da classe C60. De fato, essa propriedade está diretamente relacionada à resistência à compressão, ou seja, quanto maiores os valores de resistência à compressão, maiores são os valores de resistência à tração. Apesar de essas propriedades estarem relacionadas não existe uma proporcionalidade direta, pois conforme a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma taxa decrescente. Além disso, não foi observada influência da origem do resíduo e da fração granulométrica dos agregados reciclados

utilizados no comportamento à tração por compressão diametral dos concretos de resistência normal e de alta resistência desse estudo.

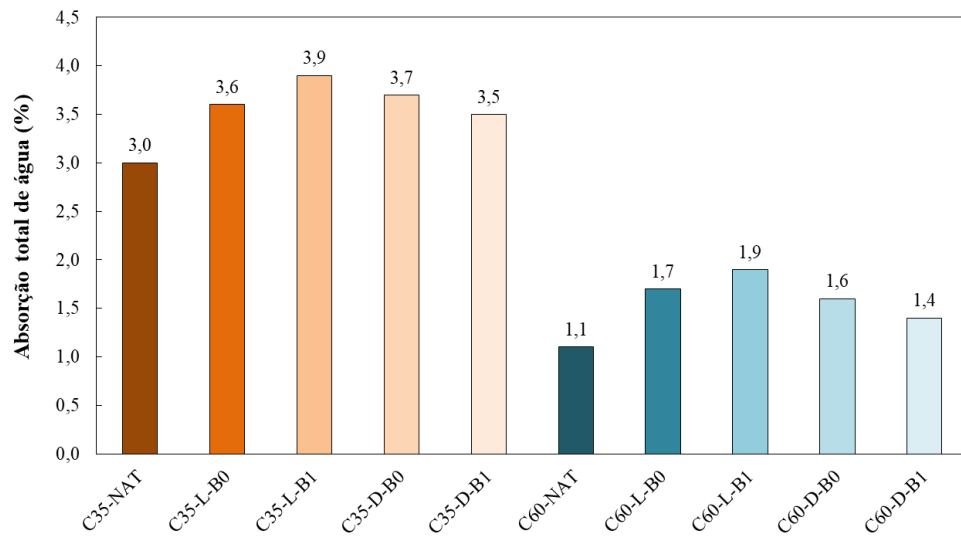


**Figura 3.10 – Resultados de tração por compressão diametral dos concretos de resistência normal e de alta resistência**

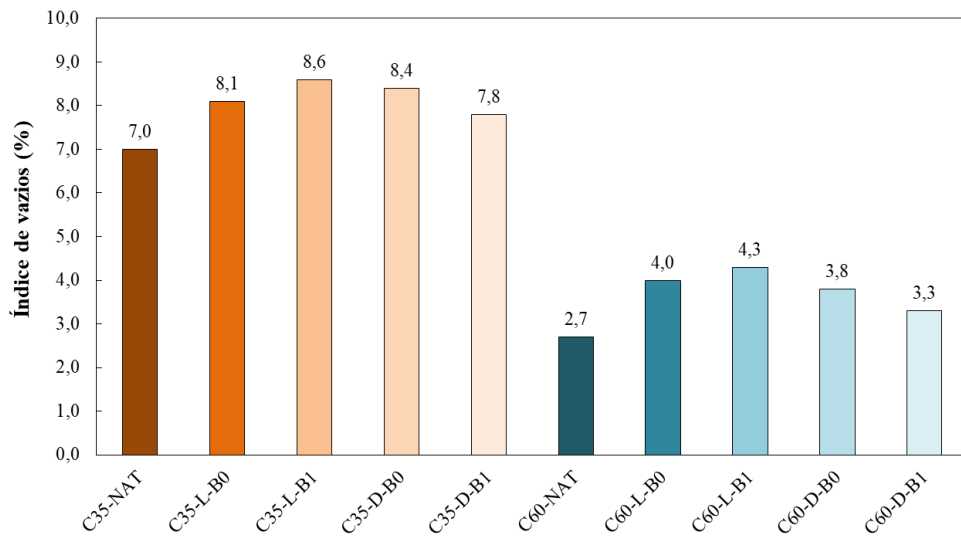
### **3.3.3. Absorção total de água, índice de vazios e massa específica**

A Figura 3.11 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção total de água por imersão, índice de vazios e massa específica para os concretos produzidos.

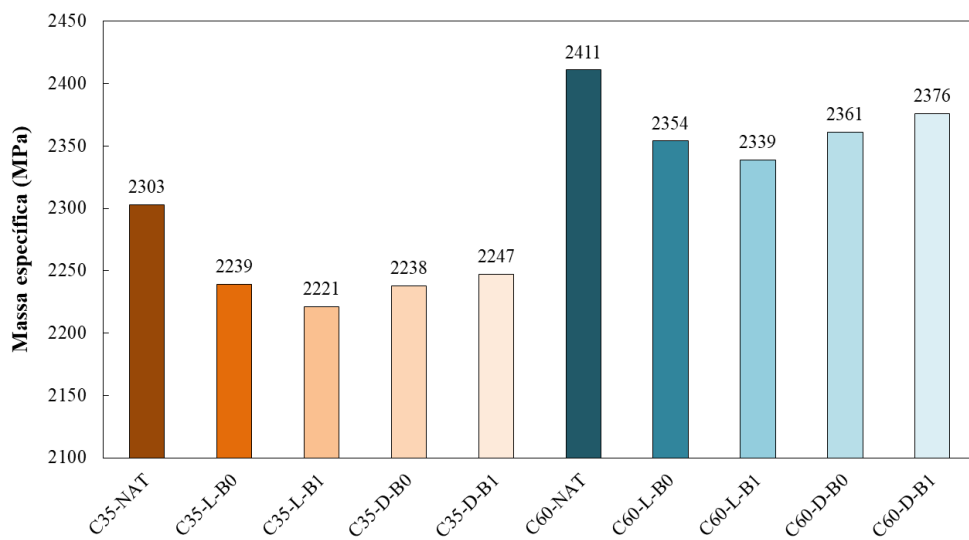
Nota-se que os concretos contendo apenas agregados naturais (C35-NAT e C60-NAT) apresentaram os maiores valores de massa específica e os menores valores de absorção total de água e índice de vazios dentro de suas classes de resistência. Esses resultados condizem com as conclusões obtidas em diversos estudos disponíveis na literatura, visto que a maior porosidade da argamassa envelhecida aderida aos grãos dos agregados reciclados confere uma maior absorção aos concretos reciclados e consequentemente, esses poros preenchidos por ar reduzem os valores de massa específica de concretos reciclados.



(a)



(b)



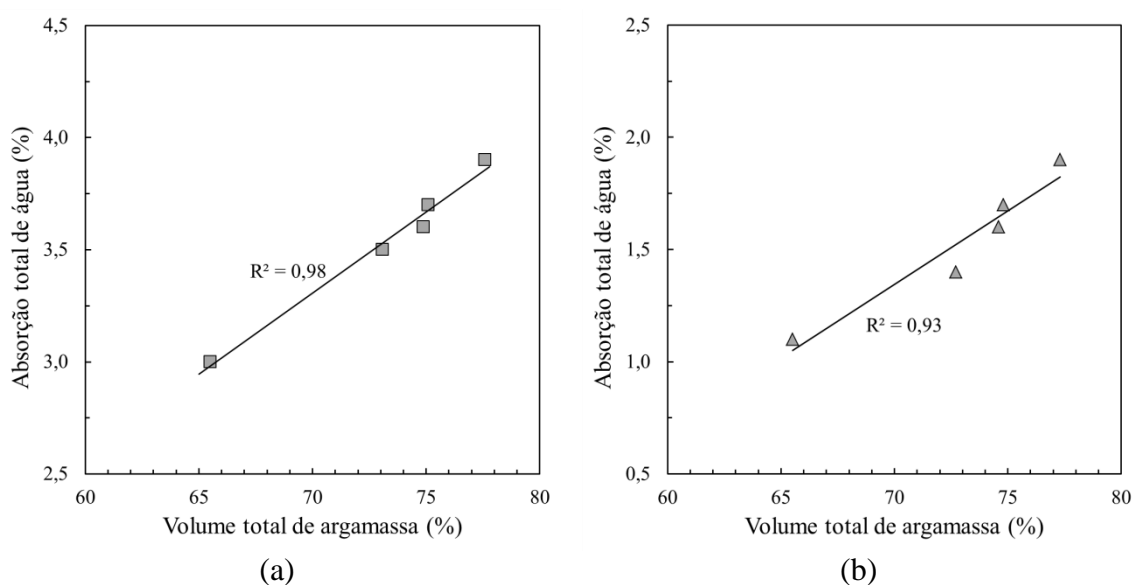
(c)

**Figura 3.11 – Resultados de absorção total de água para os concretos de resistência normal e de alta resistência**

Além disso, as misturas da classe C35 apresentaram maiores valores de absorção total de água e índice de vazios que as misturas da classe C60. Esse fato está associado principalmente aos maiores valores de fator a/c dessas misturas que tornam a pasta de cimento mais porosa. Conseqüentemente, as misturas da classe de resistência normal apresentam menores valores de massa específica do que as misturas da classe de alta resistência. Isso também pode estar relacionado ao menor consumo de cimento das misturas da classe C35 em relação às misturas da classe C60.

Conforme mostrado no capítulo anterior, o teor de argamassa aderida aos grãos de agregado reciclado apresenta-se como parâmetro-chave para o desenvolvimento das propriedades desses materiais. Dessa forma, quando os agregados reciclados estão presentes na composição de concretos, esse parâmetro deve apresentar grande influência nas características exibidas pelos concretos produzidos.

A Figura 3.12 apresenta a relação entre os valores obtidos para absorção total e o volume total de argamassa dos concretos.



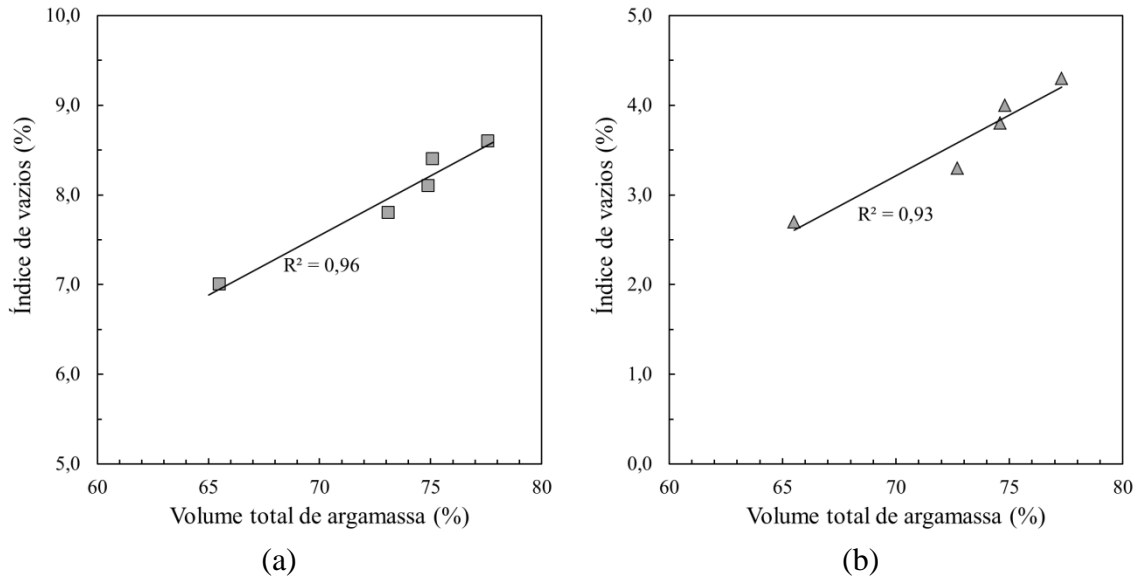
**Figura 3.12 – Relação entre absorção total de água e volume total de argamassa dos concretos: (a) classe C35 e (b) classe C60**

Conforme explicado na seção de dosagem dos concretos, esse volume representa a soma do volume de argamassa envelhecida aderida aos agregados reciclados e do volume de argamassa do concreto. De fato, observa-se que essas propriedades estão fortemente relacionadas e isso confirma que a maior absorção total de água dos concretos reciclados é provocada pela maior absorção dos agregados reciclados. Assim, quanto

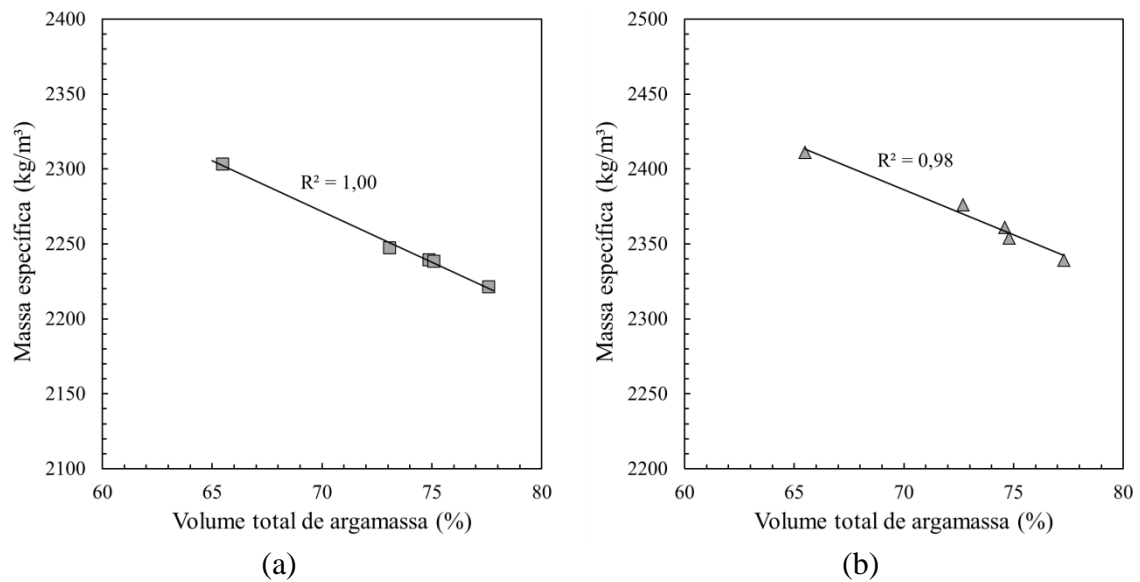


maior a o teor de argamassa aderida ao agregado reciclado, maior tende a ser a absorção total de água do concreto produzido com esse agregado.

Como a massa específica e o índice de vazios são também propriedades relacionadas à absorção de água do concreto, elas também apresentam grande relação com o volume total de argamassa (Figura 3.13 e Figura 3.14).



**Figura 3.13 – Relação entre índice de vazios e volume total de argamassa dos concretos: (a) classe C35 e (b) classe C60**



**Figura 3.14 – Relação entre massa específica e volume total de argamassa dos concretos: (a) classe C35 e (b) classe C60**

### ***3.4. Conclusões do capítulo***

Portanto, esse capítulo apresentou uma caracterização inicial com as principais propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados de duas fontes de origem de resíduo de concreto. As principais conclusões são sintetizadas nos itens a seguir:

- O método de dosagem científica adotado para a composição dos concretos e o método de compensação de água de absorção dos agregados reciclados foram adequados para as misturas do estudo, mostrando resultados bem satisfatórios tanto na trabalhabilidade quanto na resistência à compressão aos 28 dias.
- A origem dos agregados reciclados mostrou ter influência no comportamento sob compressão axial nos concretos de resistência normal (35 MPa). As misturas produzidas com agregados provenientes do resíduo de laboratório apresentaram uma menor capacidade de suportar a carga aplicada após atingir a tensão de pico, enquanto as misturas contendo agregados reciclados do resíduo de demolição apresentaram comportamento semelhante ao da mistura de referência.
- A presença de uma argamassa aderida de melhor qualidade nos agregados reciclados do resíduo de laboratório, comprovada pelos resultados do parâmetro “p” do Modelo de Empacotamento Compressível, ocasionaram maiores valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade nas misturas de resistência normal, quando comparados com os resultados das misturas produzidas com resíduo de demolição.
- Para os resultados de tração por compressão diametral, não foi observada influência da origem do resíduo e da fração granulométrica dos agregados reciclados nos concretos de resistência normal e de alta resistência desse estudo.
- Por fim, conforme mostrado no Capítulo 2, o teor de argamassa aderida aos agregados reciclados revelou-se como um parâmetro-chave para o desenvolvimento de diversas propriedades dos agregados reciclados e conseqüentemente, dos concretos reciclados que contêm esses agregados. Os valores de absorção total de água, índice de vazios e massa específica apresentaram forte correlação com o volume total de argamassa, isto é, a soma do volume de argamassa envelhecida presentes nos grãos do agregado reciclado e do volume de argamassa do concreto produzido.

## Capítulo 4

# Reologia no estado fresco de concretos reciclados

### 4.1. Revisão da literatura

Reologia e trabalhabilidade são termos utilizados muitas vezes como sinônimos, mas que estão relacionados a diferentes propriedades do concreto. A reologia é uma propriedade relacionada ao estudo do escoamento e deformação de materiais, tanto no estado fresco, como endurecido. Já a trabalhabilidade é uma propriedade do concreto no estado fresco que determina a facilidade com que o material pode ser misturado, manuseado, posicionado em moldes ou formas e adensado sem perda da homogeneidade (GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2017).

O ensaio mais utilizado para avaliar a trabalhabilidade de concretos é o ensaio de abatimento de tronco de cone, também chamado de *Slump test*. Este ensaio consiste na medida do adensamento do concreto por ação da gravidade logo após a retirada de um molde cônico e é regulamentado pela ABNT NBR NM 67 (1998). Porém, alguns autores tem mostrado que, apesar de sua facilidade de execução, o ensaio de abatimento de tronco de cone não é suficiente para caracterizar as propriedades reológicas do concreto no estado fresco (KIM *et al.*, 2013; SOUALHI *et al.*, 2017).

Diferentes estudos disponíveis na literatura mostram que o concreto de trabalhabilidade normal, isto é, com abatimento maior que 80 mm e sem segregação, pode ser descrito de forma mais simples e bem aceitável através do modelo de *Bingham* (BANFILL, 2006; CARRO-LÓPEZ *et al.*, 2017). Este modelo é representado pela Equação (4.1):

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (4.1)$$

Onde:

$\tau$  é a tensão de cisalhamento (Pa);

$\tau_0$  é a tensão de escoamento (Pa);

$\mu$  é a viscosidade plástica (Pa.s);

$\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação (1/s).

Neste tipo de fluido, é observada uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, a partir do momento em que se atinge uma tensão de cisalhamento inicial. A tensão de escoamento representa a tensão necessária para iniciar (tensão de escoamento estática) ou manter o escoamento (tensão de escoamento dinâmica), enquanto a viscosidade plástica expressa o aumento na tensão de cisalhamento, depois de atingida a tensão de escoamento, conforme a taxa de deformação é aumentada (GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2017). Em outras palavras, a tensão de escoamento é a tensão cisalhante mínima necessária para que o material inicie seu escoamento enquanto a viscosidade plástica é uma propriedade relacionada à resistência às deformações provocadas por forças cisalhantes. Assim, durante o ensaio de abatimento de tronco de cone, o escoamento do concreto é interrompido no momento em que a tensão cisalhante for menor que a tensão de escoamento do concreto. Acredita-se então que existe uma relação entre o *slump* com a tensão de escoamento do concreto (WALLEVIK, 2006).

Os parâmetros reológicos do modelo de *Bingham*,  $\tau_0$  e  $\mu$ , são obtidos através da utilização de equipamentos conhecidos como reômetros ou viscosímetros. DE LARRARD *et al.* (1994) e HU & DE LARRARD (1995) desenvolveram um reômetro para concretos chamado de BTRHEOM. Este equipamento apresenta uma geometria de placas paralelas, onde a base é fixa e a parte superior gira em torno de um eixo vertical fixo. De acordo com DE LARRARD (1999), esta geometria é a mais adequada para testar um material como o concreto. Através das diferentes velocidades de rotação impostas ao concreto e da medida do torque gerado pela resistência ao cisalhamento é possível obter os parâmetros de *Bingham*, isto é, tensão de escoamento e viscosidade plástica. Eles podem ser calculados a partir das Equações (4.2) e (4.3):

$$\tau_0 = \frac{3 \cdot \Gamma_0}{2 \cdot \pi (R_2^3 - R_1^3)} \quad (4.2)$$

$$\mu = \frac{h \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial N}}{\pi^2 (R_2^4 - R_1^4)} \quad (4.3)$$

Onde:

$\tau_0$  é a tensão de escoamento (Pa);

$\Gamma_0$  é o coeficiente linear da reta torque x velocidade rotacional (N);

$R_1$  é o raio menor do equipamento BTRHEOM (m);

$R_2$  é o raio maior do equipamento BTRHEOM (m);

$\mu$  é a viscosidade plástica (Pa.s);

$h$  é a altura do equipamento BTRHEOM (m);

$\frac{\partial \Gamma}{\partial N}$  é o coeficiente angular da reta torque x velocidade rotacional (N).

Apesar do modelo de *Bingham* descrever o comportamento da maioria dos concretos com muita precisão, diferentes autores acreditam que este modelo não é adequado para concretos auto adensáveis devido ao comportamento não linear de cisalhamento deste tipo de concreto (DE LARRARD *et al.*, 1998; MAHMOODZADEH & CHIDIAC, 2013, GÜNEYISI *et al.*, 2016). Esta não linearidade gera uma tensão de escoamento negativa através do cálculo do modelo de *Bingham*. Assim, o modelo de *Herschel-Bulkley* é considerado o mais aplicável para este tipo de concreto. Inicialmente, são obtidos alguns parâmetros numéricos através de uma regressão não-linear dos dados experimentais. Através destes parâmetros é possível obter os parâmetros do modelo *Herschel-Bulkley* por meio de equações propostas por DE LARRARD *et al.* (1998). Neste modelo, considerado como “três parâmetros”, ainda é possível relacionar os parâmetros obtidos com os parâmetros do modelo de *Bingham* através da determinação de uma viscosidade plástica equivalente.

Como o concreto pode ser considerado um material compósito contendo cimento, aditivos minerais, água, agregados e aditivos químicos, suas propriedades reológicas dependem da qualidade de cada constituinte usado na mistura e de suas interações. A pasta é um componente essencial do concreto que reveste os agregados, preenche os espaços entre eles e fornece fluidez. Em geral, o aumento do volume de pasta provoca um aumento no abatimento de tronco de cone, redução na tensão de escoamento e na viscosidade plástica. Já os agregados com grãos de grandes dimensões e superfície rugosa tendem a restringir o fluxo de concreto e aumentar a tensão de escoamento e viscosidade plástica do concreto. E, geralmente, as composições químicas do agregado têm pouco efeito sobre as propriedades reológicas (JIAO *et al.*, 2017).

Em relação aos concretos reciclados, uma das suas principais características é a perda na trabalhabilidade, quando comparado a concretos contendo agregados naturais. Este comportamento está diretamente relacionado à elevada porosidade da argamassa aderida aos grãos dos agregados reciclados. Além disso, a forma e a textura dos agregados reciclados também podem influenciar na mudança da trabalhabilidade de concretos reciclados. Com isso, estudos recentes têm sido desenvolvidos a fim de compreender melhor como a utilização de agregados reciclados afetam as propriedades dos concretos no estado fresco.

KIM *et al.* (2013) estudaram a influência de algumas variáveis no comportamento reológico do concreto no estado fresco. Entre elas estão o teor de substituição de agregados naturais por agregados reciclados de concreto e a umidade inicial dos agregados reciclados na mistura (seco ou saturado superfície seca). As propriedades reológicas foram avaliadas através da utilização do reômetro ICAR e do ensaio de abatimento de tronco de cone. Os autores observaram que o aumento do teor de agregados reciclados melhorou a trabalhabilidade dos concretos. Eles acreditam que a elevada quantidade de água absorvida pelo agregado reciclado pode ter aumentado a água total da mistura, na condição saturado superfície seca. Além disso, o formato arredondado dos grãos aliado a sua baixa massa específica pode ter reduzido a resistência friccional do material. Com relação à tensão de escoamento, os autores observaram que ocorreu uma diminuição deste valor conforme foi aumentado o teor de agregados reciclados, enquanto houve um aumento no abatimento. Não foi observada influência significativa na viscosidade plástica com o aumento do teor de agregados reciclados.

FALESCHINI *et al.* (2014) analisaram a influência de dois diferentes métodos de dosagem (Método de Bolomey e Método do EMV – “Volume equivalente de argamassa”) nas propriedades reológicas de concretos com agregados reciclados. Para isso, foram produzidos concretos com diferentes teores de agregados reciclados e com fator água/cimento de 0,4 e 0,5. Os parâmetros reológicos foram medidos através do uso do viscosímetro ConTec BML 3. De acordo com os autores, o modelo de *Bingham* descreveu adequadamente o comportamento reológico dos concretos reciclados. Além disso, o método de dosagem utilizado afetou nos parâmetros reológicos do concreto, principalmente no Método do EMV que reduziu consideravelmente o abatimento e consequentemente aumentou a tensão de escoamento. Outra questão levantada pelos

autores foi o fenômeno da migração dos grãos durante o ensaio no viscosímetro. Este fenômeno ocorre principalmente em misturas com baixo teor de argamassa fresca e elevado volume de agregados graúdos, onde os grãos tendem a migrar de regiões com altas taxas de cisalhamento para regiões de baixa taxa de cisalhamento, isto é, da parte interna do viscosímetro para as paredes externas do equipamento. Este fenômeno pode afetar a leitura dos parâmetros reológicos e por isso deve ser considerado na análise dos resultados experimentais. Como solução, os autores sugerem a utilização de baixas velocidades de rotação.

CARRO-LÓPEZ *et al.* (2015), GÜNEYISI *et al.* (2016) e CARRO-LÓPEZ *et al.* (2017) avaliaram a influência da utilização de agregado miúdo reciclado na produção de concretos auto adensáveis. Eles observaram que os concretos com até 100% de substituição dos agregados conseguiram manter suas propriedades auto adensáveis por pelo menos 60 minutos após o contato inicial entre o cimento e a água.

AMER *et al.* (2016) estudaram a influência da utilização de agregados reciclados na condição saturado superfície seca na propriedades reológicas e mecânicas de concretos. Para isso, os agregados graúdos naturais foram parcialmente substituídos por agregados reciclados de concreto e a trabalhabilidade foi mantida através do uso de superplastificante. De acordo com os autores, para concretos reciclados com baixo fator  $a/c$ , é preferível utilizar agregados na condição saturado superfície seca para manter a dosagem de superplastificante adequada. Além disso, a utilização de agregados saturados provocou um aumento nos parâmetros reológicos.

GONZÁLEZ-TABOADA *et al.* (2017) analisaram a influência de três diferentes condições de umidade inicial de agregados reciclados nas propriedades reológicas no estado fresco de concretos auto adensáveis. O comportamento reológico foi avaliado com o uso de um reômetro juntamente com testes de abatimento do tronco de cone, caixa L, funil V e segregação com peneiramento e os ensaios foram realizados em intervalos de 15, 45 e 90 minutos contados a partir do contato água-cimento. Para os autores, o melhor método de compensação de água foi adicionar uma quantidade extra de água durante a mistura. Com este método, todas as misturas se mantiveram autoadensáveis até 45 min e, para misturas com até 50% de agregados reciclados, até 90 min após o contato água-cimento. Além disso, o modelo de *Bingham* modificado, isto é, com a utilização de 5 parâmetros, descreveu melhor o comportamento dos concretos reciclados estudados.

SILVA *et al.* (2018) obtiveram importantes conclusões a respeito da reologia de concretos reciclados, baseadas em estudos disponíveis na literatura. Para os autores, a melhor forma de considerar a elevada absorção dos agregados reciclados durante o processo de mistura é através da compensação de água direto no misturador, pois a pré-saturação dos agregados reciclados parece prejudicar o comportamento mecânico dos concretos. Em estudos em que não foi considerada a absorção dos agregados reciclados, a viscosidade plástica e a tensão de escoamento foram maiores que nos concretos de referência. Além disso, a maior rugosidade dos agregados reciclados também pareceu aumentar a tensão de escoamento.

Portanto, com base nestes estudos, nota-se que o conhecimento das propriedades reológicas de concretos reciclados no estado fresco ainda é muito restrito e que muitas questões ainda devem ser compreendidas, principalmente no que diz respeito à influência das propriedades intrínsecas de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto no estado fresco. Dessa forma, esse capítulo visa avaliar o comportamento no estado fresco de concretos reciclados e propor relações entre suas propriedades. Para isso, esse estudo foi dividido em duas partes: na primeira, foram produzidos concretos com três diferentes valores de fator água/cimento e com 0%, 50% e 100% de utilização de agregados graúdos reciclados, além de argamassas com o mesmo fator água/cimento para avaliar como essas variáveis influenciam no comportamento do concreto; na segunda parte, foi avaliada a reologia do estado fresco das dez misturas de concreto apresentadas no Capítulo 3.

#### ***4.2. Parte A: Variáveis envolvidas na reologia***

Conforme visto na revisão da literatura, muitos são os fatores relativos à composição da mistura que influenciam na reologia do estado fresco de concretos reciclados. Nessa parte do estudo, são escolhidas algumas das principais variáveis para serem analisadas, entre elas estão o fator água/cimento e o teor de substituição dos agregados reciclados. Além delas, também foi avaliada a influência da reologia da argamassa na reologia dos concretos.

De forma a avaliar somente essas variáveis, foi utilizado o método de dosagem por substituição volumétrica dos agregados naturais por reciclados em misturas sem adição de superplastificante. Dessa maneira, fatores relacionados à composição das misturas



foram mantidos fixos, como por exemplo, a água livre, o teor de pasta e a quantidade de cimento.

A reologia no estado fresco foi avaliada através de ensaios de abatimento de tronco de cone e no BTRHEOM. Mais detalhes sobre a metodologia experimental utilizada são descritos a seguir.

#### **4.2.1. *Materiais e métodos***

Essa seção apresenta a metodologia experimental utilizada na primeira parte do estudo de reologia do estado fresco.

##### **4.2.1.1. *Materiais utilizados***

A caracterização dos materiais utilizados nessa parte do estudo foi apresentada no Capítulo 2 e no Capítulo 3. O único agregado reciclado utilizado foi o RCA\_D\_B0 e as misturas foram desenvolvidas sem o uso de superplastificante.

##### **4.2.1.2. *Dosagem e composição das misturas***

Nessa parte do estudo, foram desenvolvidas 12 misturas com três diferentes valores de fator água/cimento. Visando atingir o objetivo dessa parte do estudo, as misturas foram desenvolvidas mantendo algumas variáveis fixas, como água efetiva, teor de pasta e quantidade de cimento. Por esse motivo, a dosagem das misturas foi realizada através do método tradicional de substituição, ou seja, foi desenvolvida uma composição de concreto natural e, em seguida, foram realizadas substituições, em volume, do agregado gráudo natural por agregado reciclado, para os três teores de água/cimento.

Sabe-se que esse método de dosagem não é adequado para a composição de concretos reciclados, mas ele se mostra necessário para compreender melhor os fatores que, de fato, contribuem para a mudança no comportamento reológico de concretos reciclados, já que reologia não está diretamente relacionada à resistência à compressão dos concretos. A composição das misturas é apresentada na Tabela 4.1 e dados adicionais sobre a composição das misturas dessa parte do estudo e que serão importantes na análise dos resultados são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Composição das misturas da primeira parte do estudo de reologia no estado fresco

Misturas	Nat_B0 (kg/m <sup>3</sup> )	RCA_D_B0 (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água total (kg/m <sup>3</sup> )
<b>MOR-0,4</b>	0	0	1028	809	329
<b>NAT-0,4</b>	772	0	733	575	245
<b>RAC50-0,4</b>	386	314	733	575	251
<b>RAC100-0,4</b>	0	628	733	575	257
<b>MOR-0,5</b>	0	0	1120	665	338
<b>NAT-0,5</b>	819	0	778	460	246
<b>RAC50-0,5</b>	409	333	778	460	253
<b>RAC100-0,5</b>	0	666	778	460	259
<b>MOR-0,6</b>	0	0	1184	563	344
<b>NAT-0,6</b>	850	0	808	383	247
<b>RAC50-0,6</b>	425	346	808	383	254
<b>RAC100-0,6</b>	0	692	808	383	260

Inicialmente, foram dosadas três misturas de concreto naturais com fator água/cimento de 0,4, 0,5 e 0,6 (NAT-0,4, NAT-0,5 e NAT-0,6, respectivamente) de acordo com o Modelo de Empacotamento Compressível, através do programa *Betonlab Pro 3*. Em seguida, foram realizadas substituições, em volume, de 50% e 100% do agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado, adotando o mesmo método de compensação de água de absorção dos agregados reciclado, ou seja, 50% da absorção total de água de 24 hrs. Vale ressaltar que nessa parte do estudo, optou-se por utilizar somente agregados gráudos na fração Brita 0 e de apenas origem natural e de resíduo de usina de reciclagem de concreto de demolição.

Tabela 4.2 – Dados adicionais sobre a composição das misturas da parte A do estudo de reologia no estado fresco

Misturas	Água livre (kg/m <sup>3</sup> )	Areia/cimento	Teor de pasta efetiva (%)	Fator água/cimento efetivo
<b>MOR-0,4</b>	324	1,3	57,8	0,40
<b>NAT-0,4</b>	230	1,3	41,1	0,40
<b>RAC50-0,4</b>	230	1,3	41,1	0,40
<b>RAC100-0,4</b>	230	1,3	41,1	0,40
<b>MOR-0,5</b>	332	1,7	54,1	0,50
<b>NAT-0,5</b>	230	1,7	37,5	0,50
<b>RAC50-0,5</b>	230	1,7	37,5	0,50
<b>RAC100-0,5</b>	230	1,7	37,5	0,50
<b>MOR-0,6</b>	338	2,1	51,5	0,60
<b>NAT-0,6</b>	230	2,1	35,0	0,60
<b>RAC50-0,6</b>	230	2,1	35,0	0,60
<b>RAC100-0,6</b>	230	2,1	35,0	0,60

Por fim, foi feita a exclusão do agregado graúdo, para avaliar como a argamassa interfere no comportamento reológico de concretos (MOR-0,4, MOR-0,5 e MOR-0,6). Assim, foi recalculado o volume representado pela argamassa para o volume unitário da mistura.

Nota-se, através da Tabela 4.2, que a proporção volumétrica entre os componentes da argamassa se mantém constante, ou seja, a relação areia/cimento e água/cimento efetivo são iguais para as quatro misturas de cada grupo de fator água/cimento.

#### 4.2.1.3. *Métodos de ensaios em concretos*

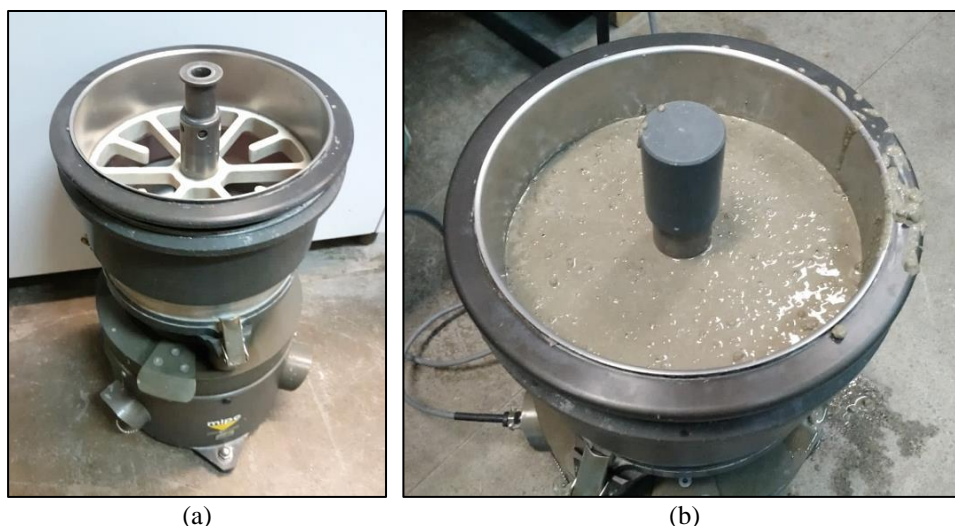
##### (a) Abatimento de tronco de cone

A metodologia de ensaio utilizada para abatimento de tronco de cone foi apresentada na seção 3.2.4.1. Visando avaliar como ocorria a perda de trabalhabilidade do concreto ao longo do tempo, na primeira parte do estudo de reologia, foram medidos os valores de abatimento de tronco de cone nos seguintes intervalos de tempo: 5, 15, 30, 45 e 60 minutos após o término da mistura. No período entre os ensaios, o concreto era mantido no misturador ligado e um pano úmido era colocado na abertura do misturador, com o objetivo de manter a umidade do material.

##### (b) Reômetro BTRHEOM

A determinação dos parâmetros reológicos  $\tau_0$  e  $\mu$  dos concretos foi realizada com a utilização do reômetro BTRHEOM, desenvolvido por DE LARRARD *et al.* (1994) e HU & DE LARRARD (1995). O ensaio consiste em utilizar uma amostra de cerca de 7 litros de concreto fresco que é cisalhada entre sua base (fixa) e o topo, que é rotacionado em torno do seu eixo vertical. Assim, uma série de valores de torque são medidos para diferentes velocidades de rotação pré-estabelecidas. A Figura 4.1 mostra detalhes deste equipamento. Foram utilizadas fitas adesivas para garantir a estanqueidade entre as partes do equipamento. O atrito devido a estas fitas é descontado dos valores de torque medidos durante o ensaio, através da calibração com água antes do início do teste.

Os ensaios foram realizados após a colocação do concreto no reômetro, imediatamente após o término da moldagem, e com pré-vibração por 15 segundos para melhor acomodação do concreto. Foram utilizadas cinco velocidades de rotação variando entre 0,3 rps e 1,2 rps.



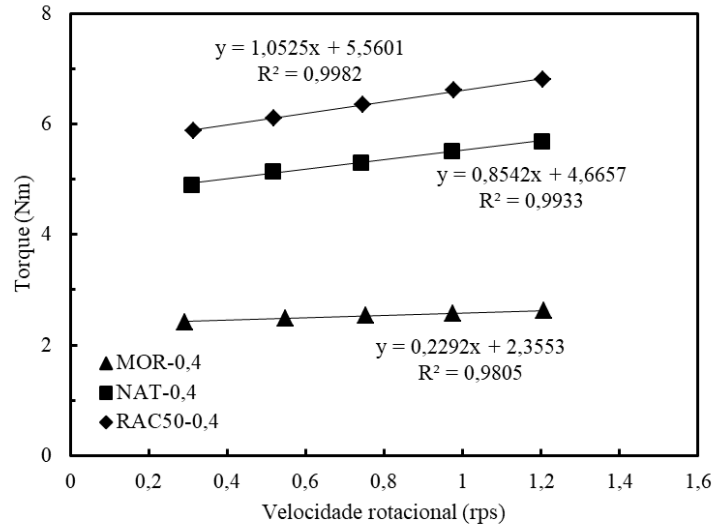
**Figura 4.1 – Reômetro BTRHEOM: (a) detalhe do equipamento; (b) ensaio em uma amostra de concreto**

(c) Resistência à compressão axial

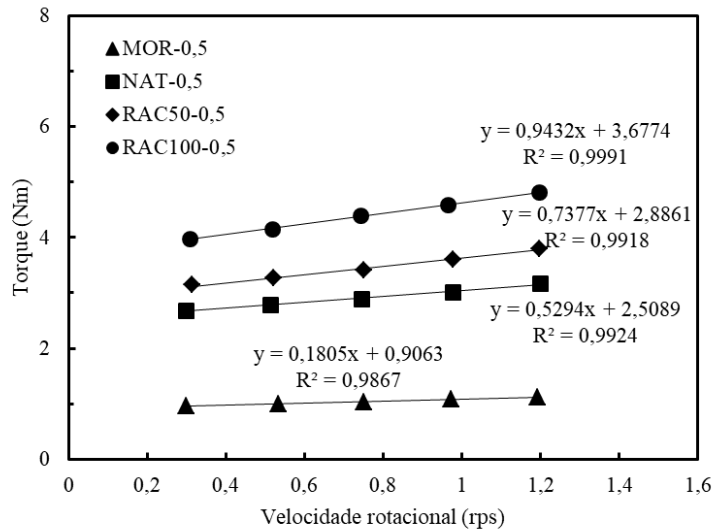
A resistência à compressão dos concretos foi avaliada através da ruptura de corpos-de-prova cilíndricos (75 mm de diâmetro e 150 mm de altura) em prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F1000kN, de acordo com as determinações da ABNT NBR 5739 (2007). Como o objetivo desse ensaio era somente verificar a classe de resistência das misturas, foi realizada somente a aquisição da carga de ruptura de corpos de prova curados em câmara úmida por 28 dias. Suas extremidades foram regularizadas através de faceamento em torno mecânico para garantir a planicidade das bases e a velocidade de carregamento foi de 0,3 mm/min.

#### **4.2.2. Apresentação e análise dos resultados**

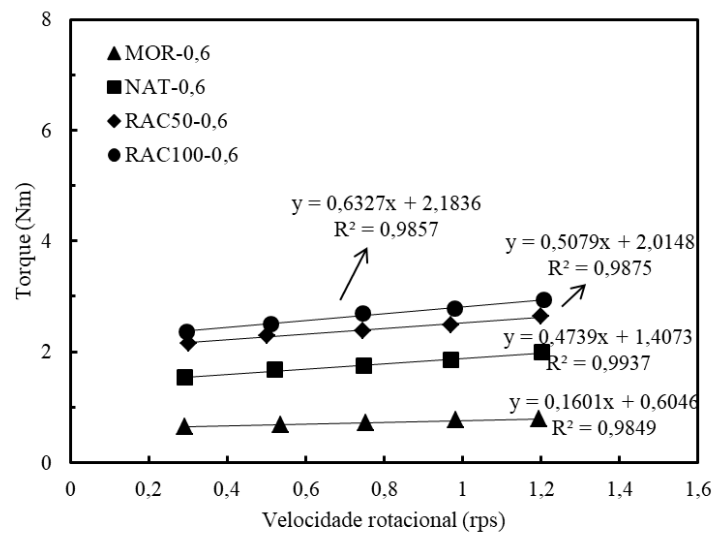
Os resultados da medida de torque para diferentes velocidades de rotação do reômetro BTRHEOM são apresentados na Figura 4.2. Observa-se, através dos valores do coeficiente de correlação das retas, que o modelo de *Bingham* é capaz de descrever, com precisão, o comportamento reológico no estado fresco das misturas produzidas. De fato, conforme visto na revisão da literatura, esse modelo se mostra bem adequado para misturas que apresentam abatimento de tronco de cone maior que 80 mm sem segregação e que não são consideradas autoadensáveis. Dessa forma, todas as misturas apresentaram um comportamento linear de cisalhamento.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2 – Resultados experimentais do torque em função da velocidade rotacional: (a) a/c = 0,4; (b) a/c = 0,5 e (c) a/c = 0,6

A partir dessas retas e de acordo com as Equações (4.2) e (4.3) apresentadas nesse capítulo, foram calculados os dois parâmetros do modelo de *Bingham*, isto é, viscosidade plástica e tensão de escoamento. Esses valores, assim como os valores de abatimento de tronco de cone no tempo e resistência à compressão aos 28 dias para as misturas com fator água/cimento de 0,4, 0,5 e 0,6 são mostrados na Tabela 4.3, na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5, respectivamente.

As misturas do grupo com fator a/c igual a 0,4 tiveram valores de tensão de escoamento variando entre 654 e 1543 Pa, enquanto a viscosidade plástica dessas misturas variou entre 11 e 51 Pa.s. Como o equipamento BTRHEOM mede os valores de torque para misturas com abatimento mínimo de 80 mm, não foi possível avaliar os parâmetros reológicos da mistura RCA100-0,4, pois esse concreto apresentou 75 mm de abatimento de tronco de cone após o término da mistura.

Já as misturas do grupo com fator a/c igual a 0,5 apresentaram valores de tensão de escoamento entre 252 e 1021 Pa e viscosidade plástica entre 9 e 46 Pa.s. As misturas do grupo com fator a/c igual a 0,6 tiveram valores de tensão de escoamento entre 168 e 606 Pa e viscosidade plástica entre 8 e 31 Pa.s.

**Tabela 4.3 – Propriedades no estado fresco e resistência à compressão das misturas da primeira parte do estudo de reologia (fator a/c = 0,4)**

Misturas	Abatimento de tronco de cone (mm)		Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	f <sub>c28</sub> (MPa)
<b>MOR-0,4</b>	5 min	140	654	11	54,1 (± 3,4%)
	15 min	140			
	30 min	130			
	45 min	125			
	60 min	115			
<b>NAT-0,4</b>	5 min	145	1295	42	49,8 (± 3,7%)
	15 min	140			
	30 min	120			
	45 min	105			
	60 min	95			
<b>RAC50-0,4</b>	5 min	115	1543	51	44,1 (± 2,5%)
	15 min	105			
	30 min	90			
	45 min	80			
	60 min	75			
<b>RAC100-0,4</b>	5 min	75	-	-	38,4 (± 2,7%)
	15 min	65			
	30 min	55			
	45 min	50			
	60 min	45			

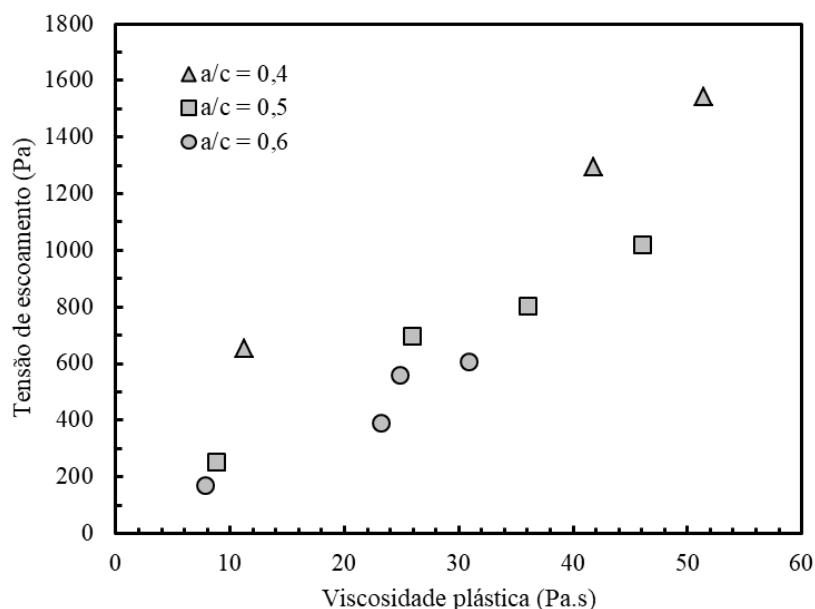
**Tabela 4.4 – Propriedades no estado fresco e resistência à compressão das misturas da primeira parte do estudo de reologia (fator a/c = 0,5)**

Misturas	Abatimento de tronco de cone (mm)		Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	f <sub>c28</sub> (MPa)
<b>MOR-0,5</b>	5 min	260	252	9	39,4 (± 4,5%)
	15 min	245			
	30 min	235			
	45 min	220			
	60 min	215			
<b>NAT-0,5</b>	5 min	180	696	26	36,2 (± 3,2%)
	15 min	170			
	30 min	150			
	45 min	125			
	60 min	100			
<b>RAC50-0,5</b>	5 min	170	801	36	31,6 (± 3,8%)
	15 min	155			
	30 min	130			
	45 min	115			
	60 min	100			
<b>RAC100-0,5</b>	5 min	145	1021	46	26,9 (± 4,2%)
	15 min	140			
	30 min	130			
	45 min	110			
	60 min	90			

**Tabela 4.5 – Propriedades no estado fresco e resistência à compressão das misturas da primeira parte do estudo de reologia (fator a/c = 0,6)**

Misturas	Abatimento de tronco de cone (mm)		Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	f <sub>c28</sub> (MPa)
<b>MOR-0,6</b>	5 min	260	168	8	26,8 (± 4,1%)
	15 min	250			
	30 min	245			
	45 min	235			
	60 min	230			
<b>NAT-0,6</b>	5 min	185	391	23	26,1 (± 4,8%)
	15 min	180			
	30 min	160			
	45 min	145			
	60 min	120			
<b>RAC50-0,6</b>	5 min	185	559	25	23,1 (± 5,1%)
	15 min	170			
	30 min	145			
	45 min	115			
	60 min	90			
<b>RAC100-0,6</b>	5 min	180	606	31	19,5 (± 5,7%)
	15 min	180			
	30 min	165			
	45 min	135			
	60 min	125			

Portanto, existe uma relação inversamente proporcional entre o fator água/cimento e os parâmetros do modelo de *Bingham*, ou seja, quanto menor é o fator água/cimento, maiores são a viscosidade plástica e a tensão de escoamento. Esse fato fica mais evidente na Figura 4.3 na qual é mostrada a relação entre a tensão de escoamento e a viscosidade plástica para as três classes de fator água/cimento das misturas analisadas.

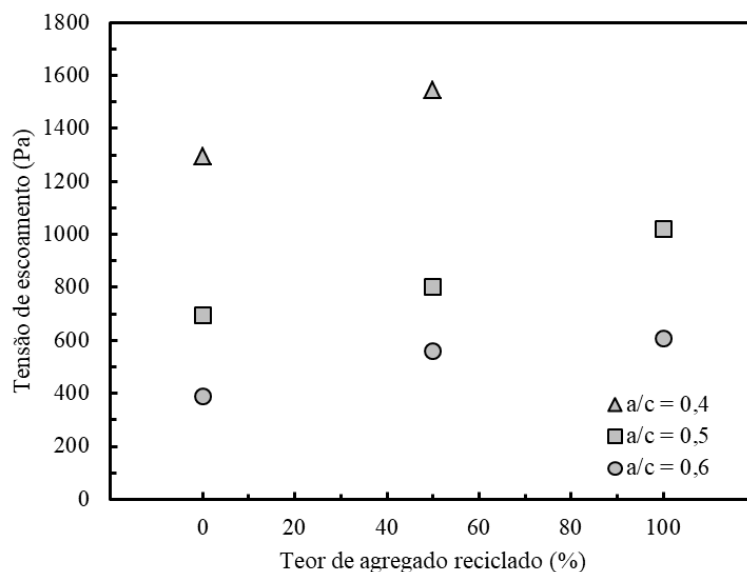


**Figura 4.3 – Relação entre a tensão de escoamento e a viscosidade plástica das misturas da parte A do estudo de reologia**

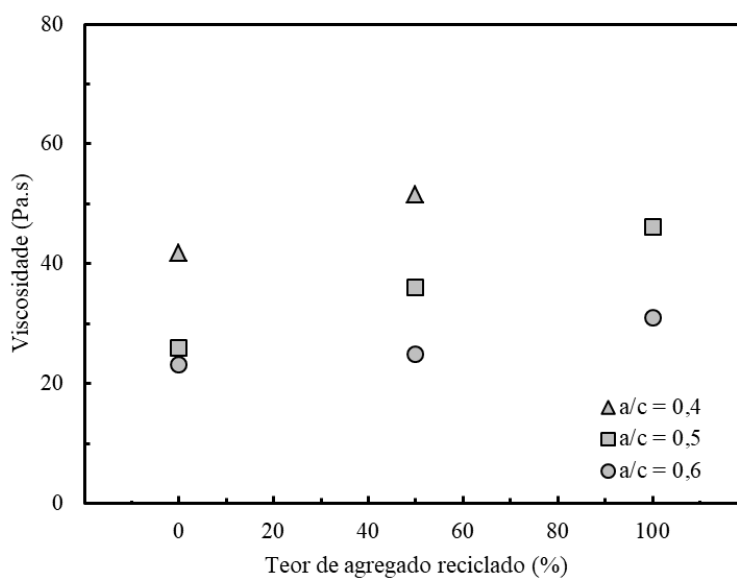
Em relação à influência da argamassa no comportamento reológico dos concretos, foi possível notar que a presença de um maior volume de pasta efetiva em relação ao volume total da mistura (conforme mostrado na Tabela 4.2) provocou um aumento no abatimento de tronco de cone e uma redução nos valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica. De fato, a pasta é um componente essencial do concreto, no qual preenche os vazios entre os agregados e fornece fluidez a mistura.

Além disso, nota-se que o aumento da substituição de agregados naturais por agregados reciclados tornou as misturas ligeiramente mais viscosas, independente do fator a/c utilizado. Isso pode ter sido provocado pela textura mais áspera dos agregados reciclados, além do método de dosagem adotado (por substituição), que já se mostrou um método inadequado para a dosagem de concretos reciclados. A Figura 4.4 e a Figura 4.5 mostram melhor essa relação.



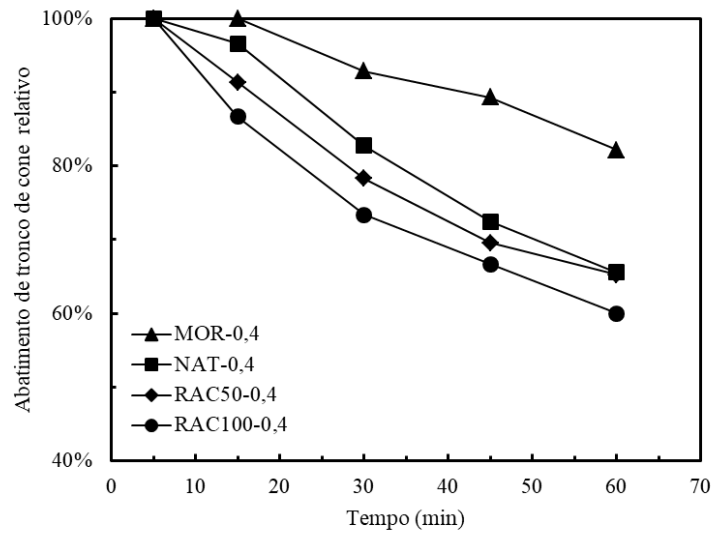


**Figura 4.4 – Relação entre a tensão de escoamento e o teor de substituição dos agregados graúdos nos concretos**

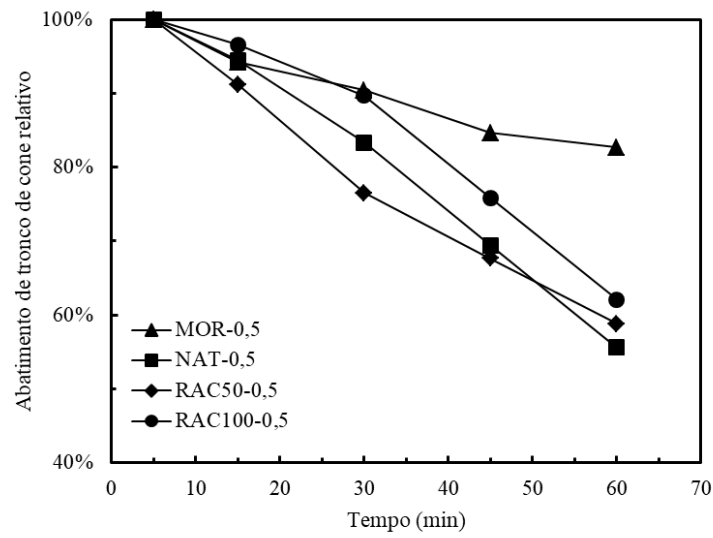


**Figura 4.5 – Relação entre a viscosidade plástica e o teor de substituição dos agregados graúdos nos concretos**

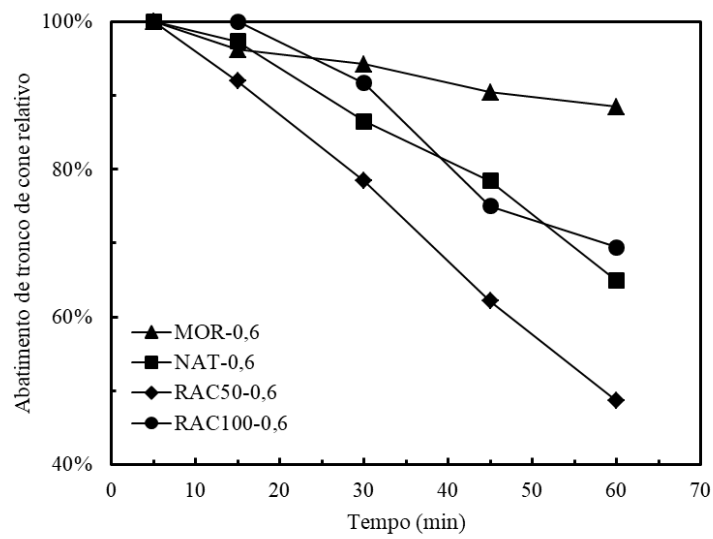
A Figura 4.6 apresenta a evolução do abatimento de tronco de cone ao longo do tempo, até 60 minutos após o término do processo de mistura. Os valores são apresentados em valores relativos ao abatimento inicial (isto é, em relação ao abatimento de 5 minutos após o final do processo de mistura) para cada uma das misturas.



(a)



(b)

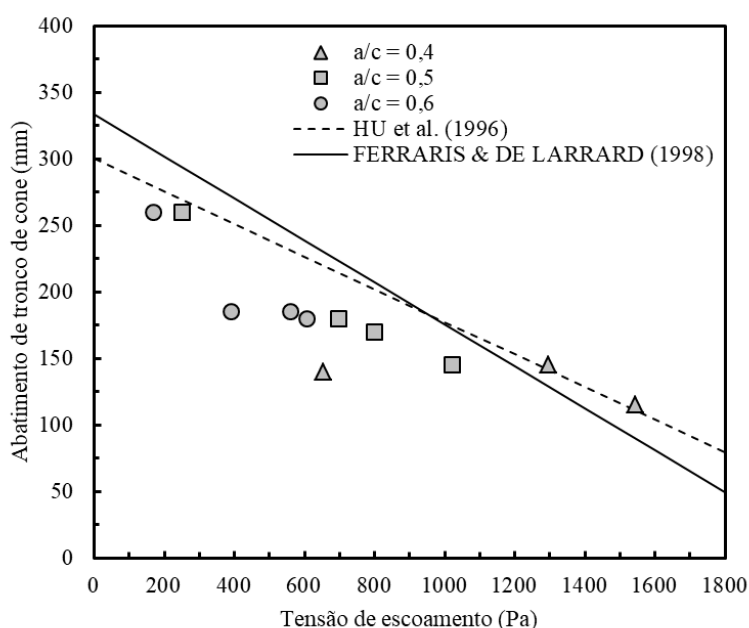


(c)

Figura 4.6 – Evolução do abatimento de tronco de cone ao longo do tempo, em valores relativos

Nota-se que, para os três valores de fator água/cimento efetivo, as argamassas apresentaram a menor perda de trabalhabilidade relativa. A porcentagem de substituição de agregado natural por agregados reciclados não pareceu ter grande influencia na perda de trabalhabilidade dos concretos, para as três classes de misturas. Além disso, até 30 minutos após o término do processo de mistura, tanto os concretos quanto as argamassas apresentaram perda de trabalhabilidade consideravelmente pequena, de até 30% do abatimento de tronco de cone inicial.

Conforme mostrado durante a revisão da literatura, é possível que exista uma relação entre os resultados de abatimento de tronco de cone e a tensão de escoamento, visto que durante o ensaio de abatimento de tronco de cone, o escoamento do concreto é interrompido no momento em que a tensão cisalhante for menor que a tensão de escoamento do concreto. Assim, a Figura 4.7 apresenta essa relação entre os dados experimentais obtidos para as misturas desse estudo e duas relações propostas por HU *et al.* (1996) e FERRARIS & DE LARRARD (1998).



**Figura 4.7 – Relação entre abatimento de tronco de cone e tensão de escoamento para os dados experimentais desse estudo e para as correlações propostas por HU *et al.* (1996) e FERRARIS & DE LARRARD (1998)**

De fato, existe uma relação linear entre esses dois parâmetros, mas os modelos propostos pelos dois autores não conseguiram descrever, com precisão, o comportamento apresentado pelas misturas desse estudo, pois ambos superestimam os valores de abatimento de tronco de cone.

Por fim, destaca-se a importância da caracterização reológica através dos dois parâmetros do modelo de *Bingham*, visto que os valores de abatimento de tronco de cone não são suficientes para descrever o comportamento no estado fresco de materiais à base de cimento. Esse fato é evidente através da análise dos resultados obtidos para as misturas MOR-0,4 e NAT-0,4 que apresentaram o mesmo valor para o abatimento de tronco de cone logo após o final do processo de mistura, mas a análise dos parâmetros reológicos mostra que essas misturas apresentam comportamentos completamente distintos. Isso também pode ser observado através dos resultados das misturas NAT-0,6, RAC50-0,6 e RAC 100-0,6.

### ***4.3. Parte B: Verificação em concretos reciclados***

Após a realização da parte A do estudo de reologia no estado fresco, novas misturas foram caracterizadas a fim de verificar se as principais conclusões obtidas para concretos com agregados de dimensão máxima igual a 9,5 mm e sem aditivo superplastificante se aplicam para concretos mais usuais, ou seja, com agregados de dimensão máxima igual a 19 mm e com superplastificante. Para isso, foram utilizadas as mesmas dez misturas apresentadas no Capítulo 3.

#### ***4.3.1. Materiais e métodos***

Nessa seção são apresentados os materiais e as metodologias aplicadas na parte B do estudo de reologia no estado fresco de concretos reciclados.

##### ***4.3.1.1. Materiais utilizados***

A caracterização dos materiais utilizados nessa parte do estudo foi apresentada no Capítulo 2 e no Capítulo 3. Foram utilizados os mesmos materiais usados na composição dos concretos do Capítulo 3, ou seja, Nat\_B1, RCA\_L\_B1, RCA\_D\_B1, Nat\_B0, RCA\_L\_B0, RCA\_D\_B0, areia natural, cimento CPV-ARI, superplastificante e água.

##### ***4.3.1.2. Dosagem e composição das misturas***

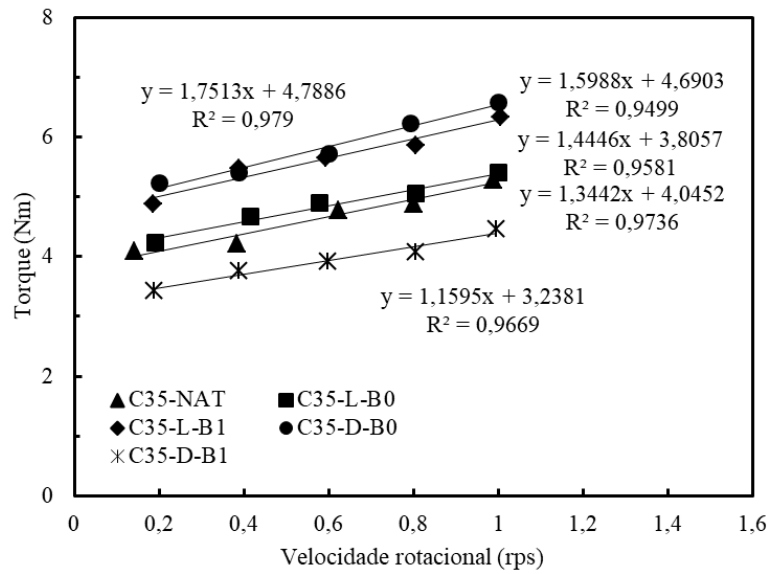
A dosagem das misturas dessa parte do estudo foram as mesmas apresentadas na Tabela 3.7, na seção 3.2.2.

#### 4.3.1.3. Métodos de ensaios em concretos

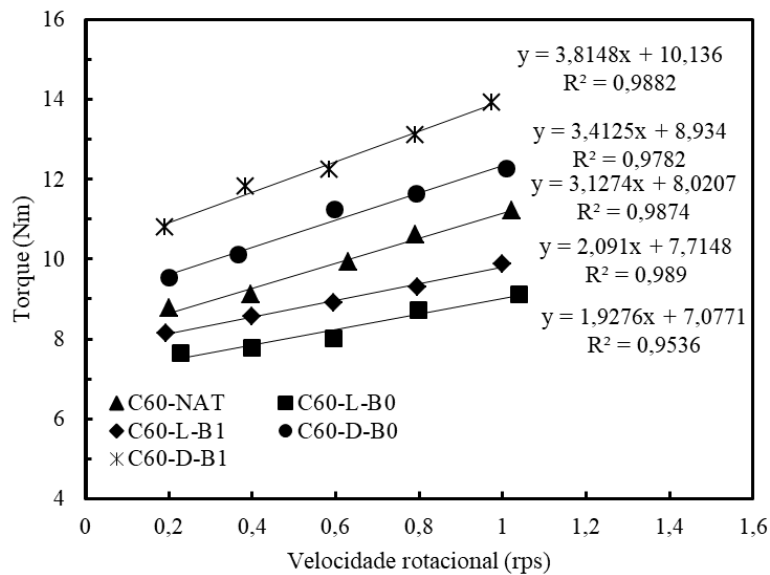
Foram utilizados os mesmos métodos de ensaios apresentados na parte A desse capítulo (seção 4.2.1.3), com exceção para o abatimento de tronco de cone que foi realizado somente ao final do processo de mistura (tempo igual a 5 minutos).

#### 4.3.2. Apresentação e análise dos resultados

A Figura 4.8 apresenta os resultados experimentais das medidas de torque em função da velocidade rotacional do equipamento BTRHEOM.



(a)



(b)

Figura 4.8 - Resultados experimentais do torque em função da velocidade rotacional para os concretos das classes: (a) C35 e (b) C60

Assim como observado na parte A desse estudo, essas misturas também podem ser descritas pelo modelo de *Bingham*, pois apresentam um comportamento linear de cisalhamento, demonstrado pelos coeficientes de correlação das retas. De fato, todas as misturas apresentaram abatimento de tronco de cone maior que 80 mm, sem segregação e não autoadensáveis.

Os resultados de abatimento de tronco de cone e resistência à compressão aos 28 dias desses concretos já foram apresentados no Capítulo 3 e são mostrados novamente na Tabela 4.6, juntamente com os valores obtidos para tensão de escoamento e viscosidade plástica.

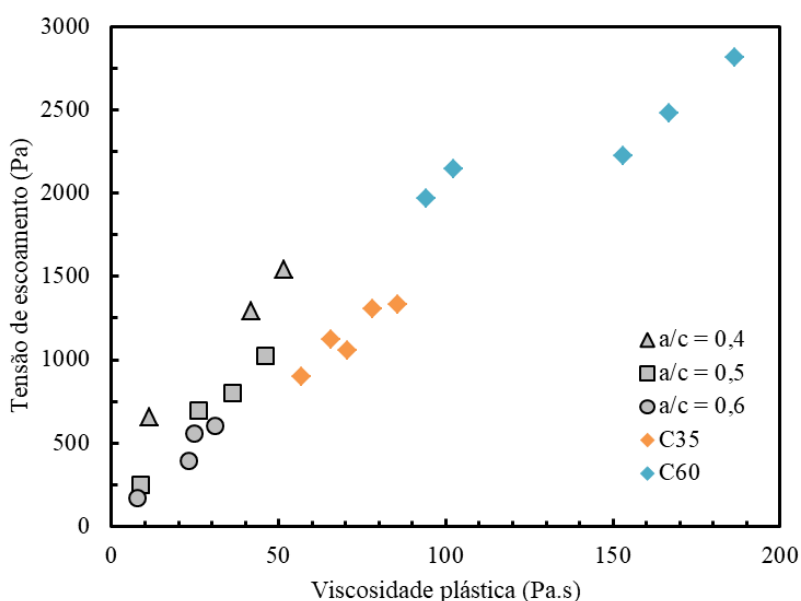
**Tabela 4.6 – Propriedades no estado fresco e resistência à compressão dos concretos da segunda parte do estudo de reologia (classes de resistência C35 e C60)**

Misturas	Abatimento de tronco de cone (mm)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)	$f_{c28}$ (MPa)
<b>C35-NAT</b>	175	1056	71	34,2 ( $\pm 2,4\%$ )
<b>C35-L-B0</b>	180	1123	66	35,7 ( $\pm 0,8\%$ )
<b>C35-L-B1</b>	165	1302	78	35,3 ( $\pm 0,9\%$ )
<b>C35-D-B0</b>	165	1329	86	34,4 ( $\pm 2,2\%$ )
<b>C35-D-B1</b>	195	899	57	33,5 ( $\pm 2,3\%$ )
<b>C60-NAT</b>	165	2227	153	60,1 ( $\pm 1,5\%$ )
<b>C60-L-B0</b>	180	1965	94	60,5 ( $\pm 1,1\%$ )
<b>C60-L-B1</b>	170	2142	102	61,9 ( $\pm 1,3\%$ )
<b>C60-D-B0</b>	165	2480	167	62,6 ( $\pm 1,0\%$ )
<b>C60-D-B1</b>	160	2814	187	59,7 ( $\pm 0,5\%$ )

Nota-se que misturas com o mesmo valor de abatimento de tronco de cone, apresentam comportamentos reológicos bem distintos, como é o caso das misturas C35-D-B0 e C60-D-B0. Ambas apresentam abatimento de tronco de cone de 165 mm e tensão de escoamento de 1329 Pa e 2480 Pa e viscosidade plástica de 86 Pa.s e 167 Pa.s, respectivamente. Isso mostra a importância da utilização de reômetros ou viscosímetros para descrever o comportamento de misturas à base de cimento no estado fresco, visto que somente o ensaio de abatimento de tronco de cone se mostra insuficiente para essa caracterização.

Além disso, a origem dos agregados reciclados e a fração granulométrica utilizada não influenciaram nos valores obtidos para os parâmetros reológicos. Nesse caso, esses parâmetros parecem estar muito mais relacionados aos valores de abatimento de tronco de cone do que aos componentes da mistura.

A relação entre os dois parâmetros do modelo de *Bingham* para cada classe de misturas é apresentada na Figura 4.9. É evidente que os concretos dessa parte do estudo, ou seja, concretos com agregado de dimensão máxima de 19 mm e com aditivo superplastificante apresentaram maiores valores tanto para tensão de escoamento quanto para viscosidade plástica. Isso pode ter sido provocado pelo maior teor de agregados, e consequentemente menor quantidade de pasta, nessas misturas em comparação com as da parte A do estudo. Porém, todas as misturas seguem a mesma tendência de quanto maior a tensão de escoamento, maior é a viscosidade plástica. Além disso, as misturas da classe C60 apresentaram os maiores valores desses dois parâmetros devido, principalmente, ao baixo fator água/cimento desses concretos.



**Figura 4.9 – Relação entre a tensão de escoamento e a viscosidade plástica de todas as misturas, tanto da parte A quanto da parte B do estudo de reologia**

Por fim, a Figura 4.10 apresenta a relação entre os valores de abatimento de tronco de cone e tensão de escoamento para todas as misturas, separadas por classes de fator água/cimento (parte A) e de resistência (parte B). Nela é possível observar que os concretos da classe C35 apresentaram comportamento semelhante aos das misturas anteriores, mostrando uma clara relação entre essas duas propriedades. Já os concretos

da classe C60 não apresentaram a mesma tendência, pois apresentaram valores de abatimento de tronco de cone relativamente próximos, mas com uma variação muito grande entre os valores de tensão de escoamento.

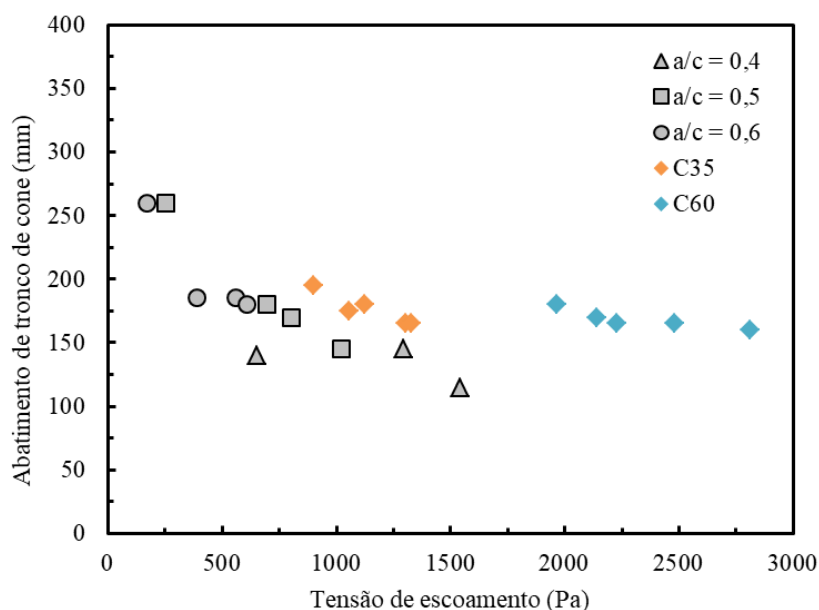


Figura 4.10 – Relação entre abatimento de tronco de cone e tensão de escoamento de todas as misturas do estudo de reologia

#### 4.4. Conclusões do capítulo

Portanto, esse capítulo apresentou os resultados experimentais do estudo de reologia no estado fresco em concretos reciclados. As principais conclusões desse capítulo são listadas a seguir:

- O modelo de *Bingham* foi capaz de descrever o comportamento reológico de todas as misturas do estudo. De fato, todos os concretos apresentaram um comportamento linear de cisalhamento, descrito através das curvas de torque medido em função da velocidade de rotação.
- O ensaio de abatimento de tronco de cone é insuficiente e serve apenas como parâmetro superficial para a avaliação da reologia de concretos. Concretos com os mesmos resultados nesse ensaio apresentaram comportamentos reológicos bem distintos, caracterizados pelos parâmetros do modelo de *Bingham* (tensão de escoamento e viscosidade plástica).



- O teor de substituição, a origem e a fração granulométrica dos agregados reciclados não influenciaram no comportamento reológico de forma significativa. Fatores como teor de pasta efetiva e fator água/cimento tiveram maior influência nas propriedades do estado fresco.
- Os concretos sem aditivo superplastificante mantiveram uma boa trabalhabilidade até 30 minutos após o término do processo de mistura. Nesse momento, eles mantiveram cerca de 80% do valor de abatimento de tronco de cone após o término da mistura.
- Os concretos produzidos com os agregados provenientes do resíduo RCA\_L apresentaram menores valores de viscosidade para uma mesma faixa de tensão de escoamento, enquanto as misturas produzidas com RCA\_D apresentaram maiores valores nessa propriedade, porém não foram observadas relações com a fração granulométrica nem com a textura desses agregados.
- Por fim, os resultados de abatimento de tronco de cone apresentaram uma relação linear com os de tensão de escoamento para a maioria das misturas, exceto para os concretos da classe C60. Essa relação é descrita por diversos autores, visto que durante o ensaio de abatimento de tronco de cone, o escoamento do concreto é interrompido no momento em que a tensão cisalhante for menor que a tensão de escoamento do concreto.

## *Capítulo 5*

# *Processo de hidratação em concretos reciclados*

### *5.1. Revisão da literatura*

As reações químicas que se iniciam logo após o contato entre o cimento e a água são chamadas de reações de hidratação do cimento. Elas são responsáveis pelo endurecimento e pelo aumento progressivo de resistência do concreto.

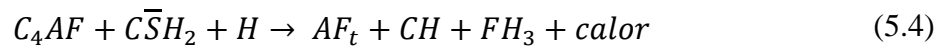
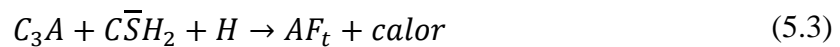
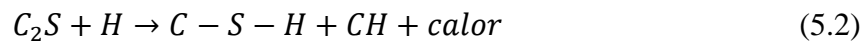
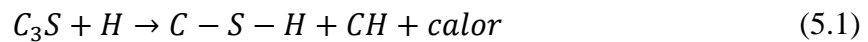
As reações de hidratação são fortemente exotérmicas, mas sua magnitude depende de muitos fatores como consumo de cimento, uso de adições, quantidade de clínquer e finura do cimento, composição do concreto, temperatura inicial, processo de cura, entre outros (VAN BREUGEL, 1991). Estas reações geram grande quantidade de calor dentro da estrutura de concreto. Em estruturas de grandes volumes, esse calor gerado no interior da peça tem dificuldade para difundir para a superfície, principalmente nas primeiras idades, onde a taxa de produção de calor é maior que a velocidade de difusão. Esta diferença provoca um aumento gradativo da temperatura e conseqüentemente à dilatação térmica da estrutura. Caso essa dilatação não ocorra livremente, podem ocorrer tensões dentro do concreto e fissuras podem surgir, prejudicando o desempenho da estrutura (SILVA, 2007). Essas fissuras devem ser evitadas na medida do possível, pois podem prejudicar a durabilidade das estruturas, principalmente em condições ambientais severas.

#### *5.1.1. Hidratação do cimento Portland*

O cimento Portland é constituído por diversos compostos, entre eles os principais são o silicato tricálcico ou alita ( $C_3S$ ), o silicato dicálcico ou belita ( $C_2S$ ), o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), ferroaluminato tetracálcico ou ferrita ( $C_4AF$ ) e gesso ou gipsita ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). Eles estão presentes em quantidades que variam de acordo com o tipo de cimento.

Ao entrar em contato com a água, ocorre uma série de reações exotérmicas e termoativadas, ou seja, ao mesmo tempo ocorre uma alteração dos campos térmicos da massa de concreto pela evolução da hidratação e ocorre também uma alteração da cinética da reação pelo aumento de temperatura do concreto (FARIA, 2004). De acordo com CHAUBE *et al.* (2014), concretos contendo cimentos com grande quantidade de C<sub>3</sub>S e C<sub>3</sub>A terão alta resistência inicial e uma grande liberação de calor durante a sua hidratação. Já os concretos com cimento com alto teor de C<sub>2</sub>S irá promover uma baixa resistência inicial (com pequena liberação de calor) e alta resistência em longo prazo.

As principais reações de hidratação são apresentadas pelas Equações (5.1), (5.2), (5.3) e (5.4). O principal produto formado é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Sua importância se deve ao fato dele formar ligações de *Wan der Walls* entre si, garantindo a aglomeração das fases sólidas, promovendo adesão e coesão.



O processo de hidratação pode ser dividido em 5 fases, mostradas na Figura 5.1. Na fase I, ocorre uma rápida e intensa liberação de calor após o contato entre o cimento e a água, devido a dissolução dos álcalis e dos íons, onde o Al<sup>3+</sup> reage com o gesso (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) e com água, formando uma camada de etringita. Com a dissolução dos componentes do cimento, aumenta-se a concentração de íons na solução, principalmente dos íons de cálcio. Esse período está representado pela fase II e pode ser chamado de período de indução. Conforme ocorre o desaparecimento dos íons SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, a camada de etringita se torna instável, provocando a sua desintegração. Esse fenômeno marca o fim do período de indução. A fase III é marcada pela formação e precipitação de C-S-H e CH de forma bastante intensa, com forte liberação de calor, gerando o segundo pico exotérmico. Nessa fase o cimento começa seu endurecimento e o ganho de resistência inicial. Na fase IV, ocorre a transformação de etringita em monossulfato pela reação entre ela e os íons Al<sup>3+</sup> não reagidos. O restante dos íons Al<sup>3+</sup> reagem formando novos hidratos que se depositam em torno dos grãos de cimento, impedindo que a água livre reaja com a sua

parte não hidratada. Por fim, inicia-se o último estágio (fase V), também chamado de controle de difusão, onde a temperatura tem pouco efeito na hidratação. Todo esse processo foi descrito por FARIA (2004).

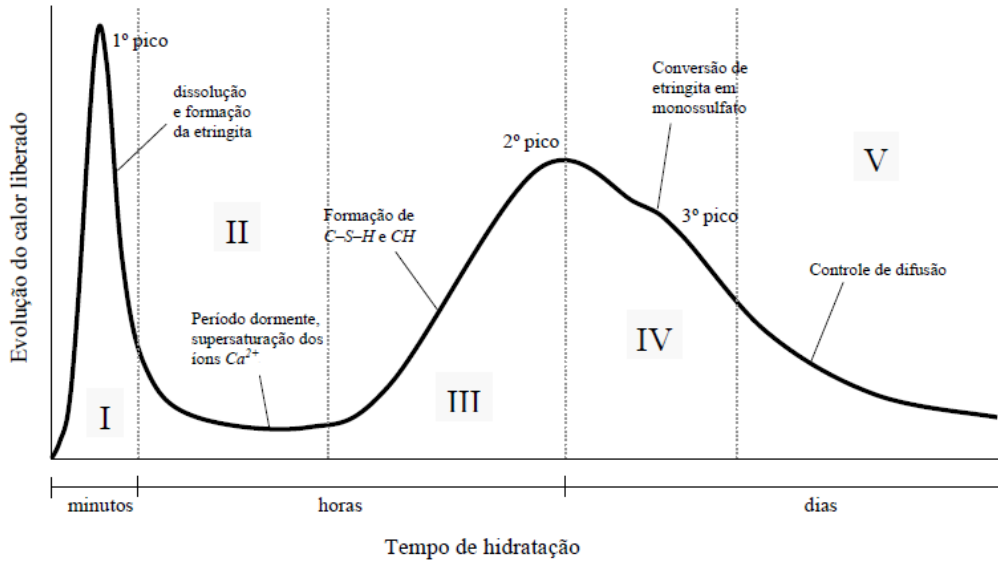


Figura 5.1 – Fases do processo de hidratação do cimento (FARIA, 2004)

### 5.1.2. Processo de hidratação em concretos

O grau de hidratação determina a evolução das reações de hidratação do cimento no tempo. O grau de hidratação no instante  $t$  pode ser definido como a relação entre a quantidade de cimento que reagiu até o instante  $t$  e a quantidade de cimento anidro inicial. Como a quantidade de cimento já hidratado no instante  $t$  é diretamente proporcional ao calor produzido até este mesmo instante  $t$ , o grau de hidratação pode ser definido pela Equação (5.5):

$$\alpha_h(t) = \frac{Q(t)}{Q_{max}} \quad (5.5)$$

Onde:

$\alpha_h(t)$  é o grau de hidratação no instante  $t$ ;

$Q(t)$  é a quantidade de calor produzido até o instante  $t$ ;

$Q_{max}$  é a quantidade máxima de calor capaz de ser produzida por todo o cimento presente na mistura.

Segundo VAN BREUGEL (1991), como o calor produzido depende da geometria e dimensões da amostra, a variação de temperatura medida na amostra, em condições adiabáticas, pode ser relacionada com o calor produzido através da Equação (5.6):

$$\Delta T_a(t) = \frac{C \cdot Q_{max}}{\rho_c \cdot c_c} \cdot \alpha_h(t) \quad (5.6)$$

Onde:

$\Delta T_a(t)$  é a variação de temperatura na amostra até o instante t, em condições adiabáticas;

C é a quantidade de cimento presente na mistura;

$\rho_c$  é a massa específica do concreto;

$c_c$  é o calor específico do concreto.

Relacionando as Equações (5.5) e (5.6), pode-se concluir que o grau de hidratação em condições adiabáticas pode ser definido através de medidas de temperatura, conforme apresentado pela Equação (5.7):

$$\alpha_h(t) = \frac{Q(t)}{Q_{max}} = \frac{\Delta T_a(t)}{\Delta T_{a,máx}} \cdot \alpha_{h,máx} \quad (5.7)$$

Onde:

$\alpha_{h,máx}$  é o grau de hidratação máximo, em condições adiabáticas, quando  $t \rightarrow \infty$ .

Assim, o grau de hidratação em concretos pode ser facilmente medido através do ensaio de elevação adiabática de temperatura em calorímetro adiabático (KOENDERS, 1997). Neste ensaio, à medida que a amostra de concreto aumenta de temperatura devido às reações de hidratação, o sistema eletrônico de controle de temperatura do calorímetro ativa a resistência elétrica de forma que a temperatura do banho sempre acompanhe a temperatura do corpo-de-prova, de maneira que ambas sejam mantidas iguais durante todo o ensaio.

Em um modelo proposto por WALLER (1999) e apresentado por DE LARRARD (1999) é possível prever a elevação adiabática de temperatura final em concretos. Nesse modelo, é calculada, inicialmente, a capacidade térmica do concreto no estado fresco,

através da soma da capacidade térmica de cada constituinte da mistura, demonstrado pela Equação (5.8).

$$C^{th} = \sum_{constituintes} m_i \cdot c_i^{th} \quad (5.8)$$

Onde:

$C^{th}$  é a capacidade térmica do concreto;

$m_i$  é a massa do constituinte  $i^{th}$  por unidade de volume de concreto;

$c_i^{th}$  é a capacidade térmica do constituinte  $i$ , dada pela Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 – Capacidade térmica de cada constituinte do concreto (De Larrard, 1999)**

Constituinte	$c_i^{th}$ (kJ/K/kg)
Agregado silicoso	0,73
Agregado de calcáreo	0,84
Agregado dolomítico	0,89
Cimento Portland anidro	0,76
Sílica ativa	0,73
Cinza volante	0,73
Água	4,19

Quando o concreto endurece em condições adiabáticas, ocorrem dois efeitos que podem modificar a capacidade térmica do concreto. Inicialmente, a transformação do cimento e materiais pozolânicos em produtos de hidratação leva a uma diminuição da capacidade térmica, principalmente por causa da diminuição do teor de água livre. Em segundo lugar, o próprio aumento da temperatura cria um aumento significativo da capacidade térmica. No geral, quando os dois efeitos são considerados simultaneamente, a mudança da capacidade térmica pode ser considerada desprezível. Portanto, o valor da capacidade térmica do concreto no estado fresco é uma boa base para modelar a elevação adiabática de temperatura (WALLER, 1999 *apud* DE LARRARD, 1999).

Em seguida, WALLER (1999) propõe o cálculo do grau máximo de hidratação do cimento. Ele propõe equações para o cálculo dessa propriedade em concretos com e sem materiais pozolânicos. Como nesse estudo não foram usadas pozolanas, é apresentada somente a equação para concretos sem adição desse material (Equação (5.9)).

$$h_c = 1 - \exp(-3,3 \cdot a/c) \quad (5.9)$$

Onde:

$h_c$  é o grau de hidratação final do cimento;

$a/c$  é o fator água/cimento do concreto.

Através da Equação (5.9) é possível notar que o cimento não atinge o grau máximo de hidratação. De fato, sabe-se que os grãos maiores de cimento nunca atingem a hidratação total, mesmo após um longo período de tempo. Isso acontece porque em um determinado estágio do processo, ocorre o desenvolvimento de uma camada de hidratos já formados em torno dos grãos de clínquer, formando uma barreira entre a água e a fase anidra. Assim, a água tem que percolar através desta camada de hidrato para formar hidratos adicionais. Quanto mais grosso o cimento, mais difícil é esse processo. Além disso, em concretos com baixos valores de fator água/cimento, o grau de hidratação final do cimento é menor que em concretos convencionais, visto que existe menor quantidade de água para hidratar os grãos do cimento (NEVILLE, 1995).

O calor de hidratação do concreto pode ser calculado através da Equação (5.10).

$$Q = (510 \cdot t_{C3S} + 260 \cdot t_{C2S} + 1100 \cdot t_{C3A} + 410 \cdot t_{C4AF}) \cdot \frac{h_c \cdot c}{100} \quad (5.10)$$

Onde:

$Q$  é o calor de hidratação do concreto, em kJ/m<sup>3</sup>;

$t_{C3S}$ ,  $t_{C2S}$ ,  $t_{C3A}$  e  $t_{C4AF}$  são os valores percentuais de cada fase do clínquer, obtidos a partir da fórmula de Bogue;

$c$  é o consumo de cimento, em kg/m<sup>3</sup>.

Por fim, de acordo com o modelo proposto por WALLER (1999), a elevação adiabática de temperatura é dada pela relação entre o calor de hidratação do concreto e sua capacidade térmica (Equação (5.11)).

$$\Delta\theta = \frac{Q}{C_{th}} \quad (5.11)$$

Outro método que pode ser utilizado para avaliar a evolução da hidratação em concretos é o ensaio de velocidade do pulso ultrassônico. Este método baseia-se no fato de que a velocidade de propagação está ligada a qualidade do concreto. Esta velocidade é calculada através da razão entre a distância entre o transdutor emissor e o transdutor receptor da onda ultrassônica e o tempo decorrido para esta trajetória (CARETTE & STAQUET, 2016). A velocidade da onda depende de vários fatores entre eles a idade do concreto. À medida que a hidratação do cimento se desenvolve, a porosidade do concreto diminui e as ondas se propagam mais rapidamente em meio sólido (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Tanto a elevação adiabática de temperatura quanto a velocidade do pulso ultrassônico podem ser relacionados com a evolução da resistência à compressão de concretos, visto que ambos são fortemente relacionados ao fator água/cimento e a composição do cimento.

JIANG *et al.* (2015) correlacionaram a resistência à compressão de concretos com a elevação de temperatura inicial proveniente da hidratação nas primeiras idades. A ideia dos autores era obter uma fórmula para a previsão da resistência à compressão através de ensaios mais rápidos e mais simples, mas com a mesma precisão. A comparação que os autores fazem é que um ensaio de resistência à compressão pode levar até 90 dias em cura, enquanto ensaios de elevação de temperatura duram em média de 3 a 7 dias. Assim, através de ensaios de elevação semi-adiabática de temperatura, os autores propuseram a Equação (5.12).

$$f_c(t) = f_c(28) \cdot \exp \left\{ s_f \cdot \left[ 1 - \left( \frac{28 - a_f}{t - a_f} \right) \right]^{0,5} \right\} \quad (5.12)$$

Onde:

$f_c(t)$  é a resistência à compressão na idade  $t$ ;

$f_c(28)$  é a resistência à compressão aos 28 dias;

$s_f$  é uma constante que considera a influência do fator água/cimento;

$a_f$  é uma que relaciona o tempo de pega do cimento a resistência do concreto.



### 5.1.3. *Hidratação em concretos reciclados*

Conforme visto nos outros capítulos, a principal diferença entre agregados reciclados e agregados naturais é a presença de uma argamassa envelhecida aderida aos grãos. Devido a sua elevada porosidade, a absorção de água dos agregados reciclados durante o processo de mistura não pode ser desprezada. Por isso, o conceito de água livre é de grande importância para compreender e avaliar algumas propriedades dos concretos, principalmente as do estado fresco.

Apesar dessas propriedades dos agregados reciclados afetarem significativamente o fator água/cimento da mistura e conseqüentemente, a água disponível para o processo de hidratação, poucos estudos foram realizados, mundialmente, para avaliar como ocorre a evolução da hidratação em concretos reciclados.

Em estudo realizado por PEPE *et al.* (2014) foram obtidas correlações lineares entre o grau de hidratação e a resistência à compressão de concretos reciclados. Neste estudo, foram utilizadas duas condições de umidade inicial (saturado superfície seca e seco em estufa) para o ARC e os concretos foram caracterizados em calorímetro semi-adiabático e através de ensaios de resistência à compressão. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a cinética de hidratação é significativamente influenciada, não apenas pelo fator água/cimento, mas também pelas condições de umidade inicial dos agregados reciclados que modificam o teor de água realmente disponível na mistura para a ocorrência da hidratação do cimento. Na mistura com agregados reciclados na condição seca apresentou um valor máximo de temperatura de 49,8°C após 10 horas, enquanto a mistura com agregados na condição saturado superfície seca atingiu a temperatura máxima de 45°C após 14 horas de ensaio. Por fim, os autores conseguiram relacionar o grau de hidratação com a resistência à compressão no tempo para os concretos reciclados do estudo.

KOENDERS *et al.* (2014) investigaram a correlação entre a evolução da hidratação e da resistência à compressão de concretos reciclados e a influência do fator água/cimento e das condições iniciais de umidade dos agregados reciclado nestas propriedades. Os resultados mostraram que, para um mesmo fator água/cimento, a mistura com agregados na condição seca apresentou um valor de pico de temperatura maior que o obtido na mistura com agregados na condição saturado superfície seca. Além disso, a condição saturado superfície seca prolongou o período de evolução da hidratação. Estes

resultados são semelhantes aos obtidos por PEPE *et al.* (2014). Por fim, KOENDERS *et al.* (2014) relacionaram os resultados experimentais deste estudo com um modelo teórico já existente para a simulação do processo de hidratação de concretos naturais. Através desta correlação foi possível propor um modelo específico para concretos com agregados reciclados onde é possível determinar os valores de resistência à compressão para diferentes condições de umidade inicial e relações água/cimento em função da evolução da hidratação.

Estes dois estudos foram as únicas publicações disponíveis na literatura que investigaram a influência da utilização de ARCs na evolução da hidratação em concretos, através de ensaios de temperatura. De fato, estes artigos contribuíram para ampliar o conhecimento neste assunto. A umidade inicial dos ARCs e os métodos de compensação de água podem afetar consideravelmente o desenvolvimento da hidratação, principalmente pela alteração da quantidade de água disponível na mistura para as reações de hidratação. Além disso, a qualidade do concreto de origem também pode influenciar neste processo.

Portanto, ainda existem muitas questões envolvidas na utilização de agregados reciclados que devem ser melhor estudadas e compreendidas. Dessa forma, esse capítulo visa avaliar a influência dos agregados reciclados no desenvolvimento da hidratação em concretos. Para isso, foram produzidas dez misturas de concretos de duas classes de resistência à compressão (resistência normal e alta resistência), com agregados reciclados de duas fontes de origens e em duas frações granulométricas. Foi utilizado um calorímetro adiabático de temperatura para determinar a evolução das reações de hidratação do cimento. Por fim, os resultados experimentais foram comparados com os resultados previstos pelo modelo de WALLER (1999) e o modelo foi ajustado para melhor se adequar aos concretos desse estudo.

## **5.2. *Materiais e métodos***

Os materiais utilizados e a metodologia empregada para a caracterização experimental do processo de hidratação são descritos nos itens a seguir.

### **5.2.1. Caracterização dos materiais**

A caracterização dos materiais utilizados nessa parte do estudo foi apresentada no Capítulo 2 e no Capítulo 3. Foram utilizados os mesmos materiais usados na composição dos concretos do Capítulo 3, ou seja, Nat\_B1, RCA\_L\_B1, RCA\_D\_B1, Nat\_B0, RCA\_L\_B0, RCA\_D\_B0, areia natural, cimento CPV-ARI, superplastificante e água.

### **5.2.2. Dosagem e composição das misturas**

A dosagem das misturas realizadas nesse capítulo foram as mesmas apresentadas na Tabela 3.7, na seção 3.2.2. Conforme já apresentado anteriormente, foi utilizado um método de dosagem científica (Modelo de Empacotamento Compressível) e adotada uma compensação de água de absorção dos agregados reciclados equivalente a 50% da absorção total. Dessa forma, evita-se que os agregados reciclados absorvam a água da mistura necessária para as reações de hidratação.

### **5.2.3. Método de ensaio – Elevação adiabática de temperatura**

O ensaio de elevação adiabática de temperatura foi realizado utilizando os calorímetros adiabáticos apresentados na Figura 5.2, de acordo com as especificações da ABNT NBR 12819 (2012).



**Figura 5.2 – Calorímetros adiabáticos de temperatura**

Ao final do processo de mistura, o concreto foi colocado no recipiente do calorímetro, dentro de um saco plástico, em duas camadas, com vibração mecânica de 30 segundos

após a colocação de cada camada. Após a moldagem, o corpo-de-prova foi tampado e vedado para evitar a perda de calor e a entrada de água durante o ensaio. Os termômetros (sensores) foram colocados em um tubo de alumínio de parede fina, situados no centro e até a meia altura do corpo de prova já posicionado na câmara interna. Os tubos foram preenchidos com óleo mineral fino, para melhorar a condução do calor. Os sensores de temperatura tinham resolução de 0,1°C.

Na medida em que a temperatura do corpo-de-prova aumentava devido às reações de hidratação, o sistema eletrônico de controle de temperatura do calorímetro ativava a resistência elétrica, de forma que a temperatura do banho sempre acompanhasse a temperatura do corpo-de-prova, fazendo com que ambas fossem mantidas iguais durante todo o ensaio. Os calorímetros possuem agitadores que garantem a homogeneidade da temperatura do banho. O volume do corpo-de-prova utilizado foi de aproximadamente 1,6 litros e o ensaio foi realizado até que a temperatura do corpo-de-prova se estabilizasse. A temperatura inicial para todos os ensaios de elevação adiabática foi de  $21,0 \pm 1,0$  °C, que é a temperatura da sala onde foram moldados os corpos-de-prova.

A elevação adiabática de temperatura ao final do ensaio é dada pela Equação (5.13).

$$E_{ad} = T_f - T_i \quad (5.13)$$

Onde:

$E_{ad}$  é a elevação adiabática de temperatura ao final do ensaio;

$T_f$  é a temperatura final do ensaio;

$T_i$  é a temperatura inicial do concreto.

O coeficiente de elevação adiabática é dado pela relação entre a elevação adiabática de temperatura ao final do ensaio e o consumo de cimento, conforme mostrado na Equação (5.14).

$$C_{ad} = \frac{E_{ad}}{C_c} \quad (5.14)$$

Onde:

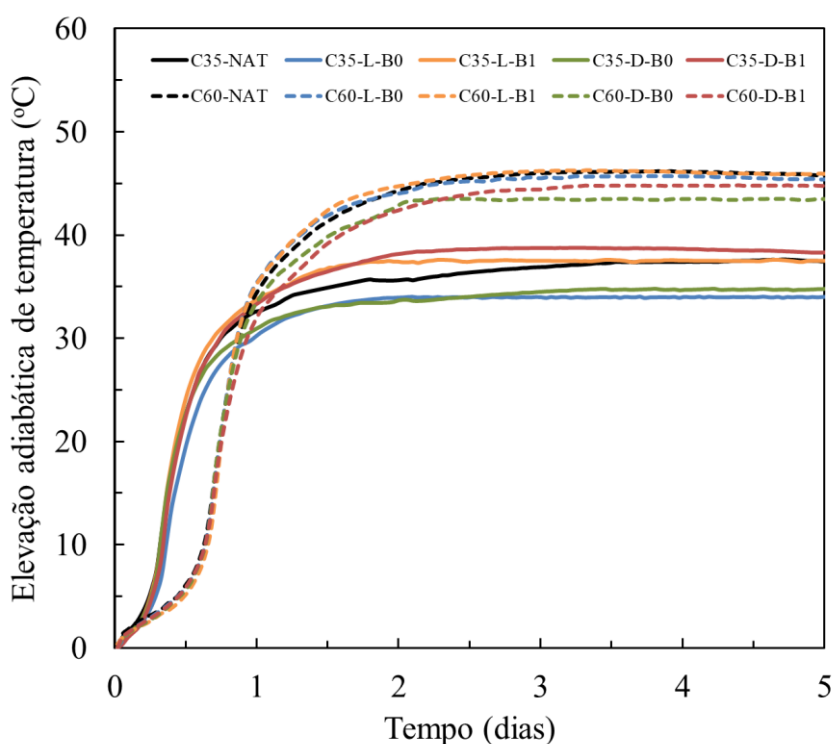
$C_{ad}$  é o coeficiente de elevação adiabática de temperatura;

$E_{ad}$  é a elevação adiabática de temperatura ao final do ensaio;

$C_c$  é o consumo de cimento.

### 5.3. Apresentação e análise dos resultados

A Figura 5.3 apresenta os resultados experimentais das curvas de elevação adiabática de temperatura dos concretos de resistência normal e de alta resistência. Os resultados de elevação adiabática de temperatura e coeficiente de elevação adiabática, assim como a temperatura inicial do ensaio de cada mistura são mostrados na Tabela 5.2.

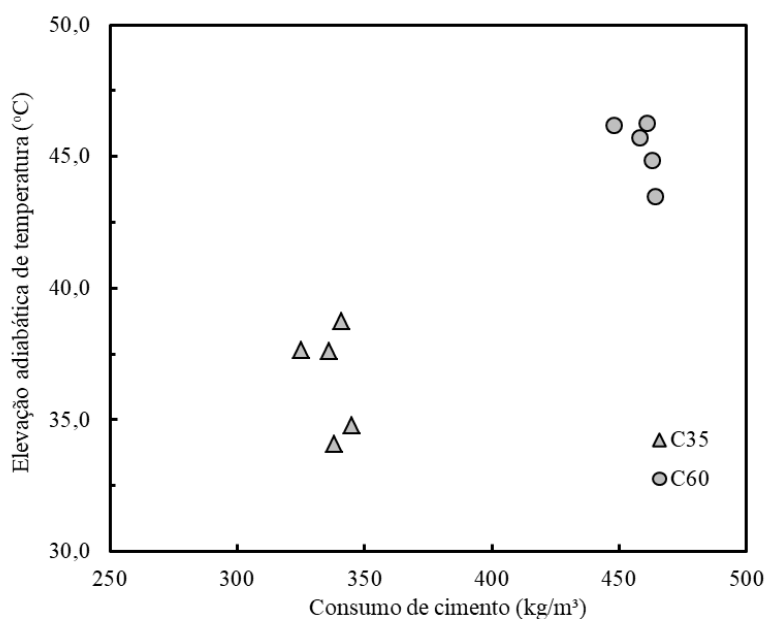


**Figura 5.3 – Curvas de elevação adiabática de temperaturas de todos os concretos das duas classes de resistência**

Através das curvas apresentadas, observa-se que, nas primeiras horas de ensaio, o despreendimento de calor é maior nos concretos de resistência normal (C35). Posteriormente, os concretos de alta resistência (C60) liberam maior quantidade de calor. Ao final do ensaio, os concretos da classe C35 apresentaram valores de elevação adiabática de temperatura entre 34,1°C e 38,8°C, enquanto os concretos da classe C60 se mantiveram na faixa de 43,5°C e 46,3°C. De fato, concretos com menores valores de fator água/cimento e maiores consumos de cimento apresentam maior liberação de calor ao final do processo de hidratação do cimento (Figura 5.4).

**Tabela 5.2 – Resultados experimentais do ensaio de elevação adiabática de temperatura dos concretos analisados**

Misturas	Temperatura inicial (°C)	Elevação adiabática de temperatura (°C)	Coefficiente de elevação adiabática (°C.m³/kg)
C35-NAT	20,1	37,6	0,116
C35-L-B0	21,8	34,1	0,101
C35-L-B1	21,9	37,6	0,112
C35-D-B0	21,7	34,8	0,101
C35-D-B1	20,2	38,8	0,114
C60-NAT	20,0	46,2	0,103
C60-L-B0	20,6	45,7	0,100
C60-L-B1	21,7	46,3	0,100
C60-D-B0	21,8	43,5	0,094
C60-D-B1	21,0	44,8	0,097

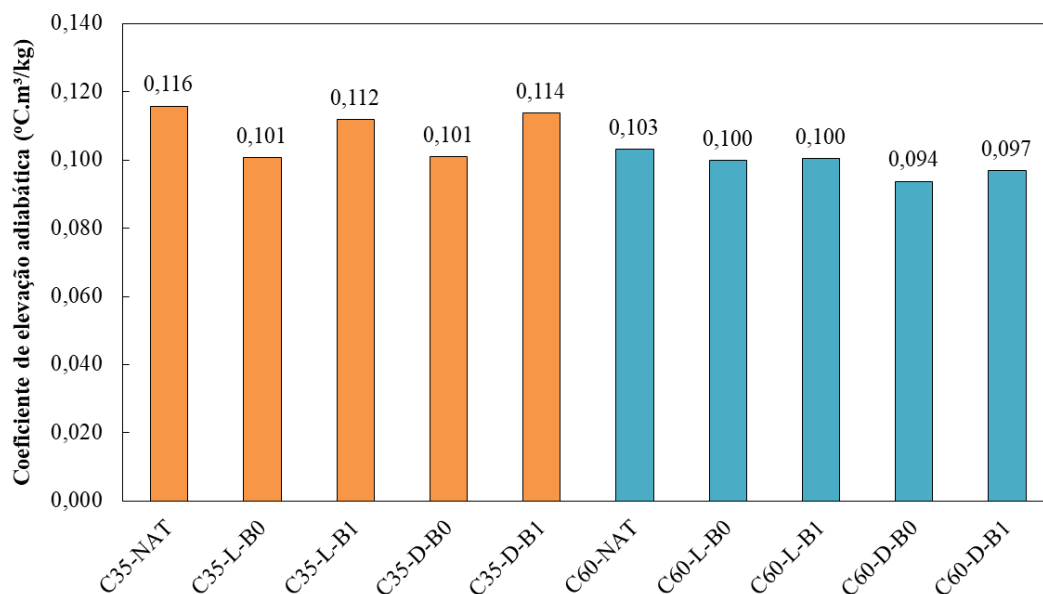


**Figura 5.4 – Relação entre os valores de elevação adiabática de temperatura e o consumo de cimento para todos os concretos**

Dentro de cada classe de concretos, não é possível observar relação entre a origem dos agregados reciclados e a elevação adiabática de temperatura. A fração granulométrica dos agregados reciclados também parece não ter influência nesse ensaio. Conforme visto durante a revisão da literatura, o processo de hidratação do cimento está muito mais relacionado às propriedades da pasta de cimento do que aos agregados. Isso mostra que a utilização de um método de dosagem científica adequado para concretos

reciclados e a compensação de água de absorção dos agregados reciclados foram fundamentais para que todos os concretos apresentassem comportamentos bem semelhantes, visto que a água livre disponível para as reações de hidratação, e consequentemente o fator água/cimento efetivo, foram mantidos constantes entre as misturas da mesma classe de resistência. Assim, dentro da classe C35, o concreto que apresentou a maior elevação adiabática de temperatura foi o C35-D-B1 e na classe C60 foi o C60-L-B1.

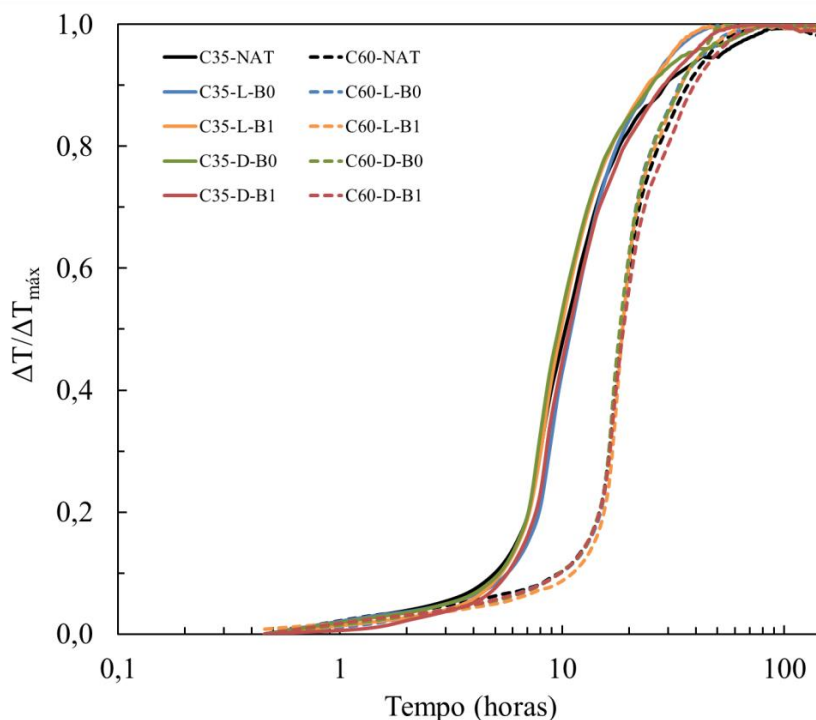
Em relação aos coeficientes de elevação adiabática apresentados na Tabela 5.2, nota-se que todos os valores encontrados estão na faixa de 0,94 °C.m³/kg a 0,116 °C.m³/kg. Observando-se a representação gráfica desses resultados na Figura 5.5, é possível perceber uma pequena tendência dos valores desse coeficiente serem menores para a classe de concretos de alta resistência. Isso pode ser devido ao maior número de grãos a serem hidratados nas misturas com maior consumo de cimento e com uma menor quantidade de água disponível para a hidratação (baixos água/cimento), fazendo com que uma parte deles permaneça anidro, liberando menos calor por massa de cimento.



**Figura 5.5 – Comparativo entre os coeficientes de elevação adiabática dos concretos**

Ainda pela análise da Figura 5.5, confirma-se que os concretos com agregados reciclados apresentaram comportamento semelhantes aos concretos de referência, para ambas as classes de resistência. Apesar disso, os concretos de referência apresentaram os maiores valores de coeficiente de elevação adiabática para sua classe de resistência.

A Figura 5.6 apresenta as curvas normalizadas de elevação adiabática de temperatura em função do tempo de ensaio. Nela, é possível observar que após 10 horas do início do ensaio, os concretos de alta resistência atingiram apenas 10% da elevação adiabática máxima, enquanto os concretos de resistência normal haviam atingido cerca de 55% da elevação adiabática máxima. Isso mostra que o processo de hidratação nas misturas de alta resistência é mais lento nas primeiras horas de ensaio. Apesar disso, após 100 horas, todos os concretos já tinham alcançado 100% da sua elevação adiabática máxima.



**Figura 5.6 – Curvas normalizadas de elevação adiabática de temperatura dos concretos para as duas classes de resistência**

Nas curvas de elevação adiabática de temperatura e nas curvas de elevação adiabática normalizadas, ainda é possível definir três fases: fase de indução, fase de aceleração e fase de desaceleração. Durante o período de indução, as reações de hidratação ocorrem muito lentamente, devido à formação de uma camada de gel de C-S-H ao redor das partículas de cimento. Quando essa camada é rompida, a velocidade de reação de hidratação é aumentada devido à difusão iônica facilitada. Nesse momento, ocorre a rápida formação do C-S-H e do C-H (período de aceleração) e, conseqüentemente, uma redução gradual da concentração dos íons de cálcio. Após esse período, continuam ocorrendo a formação de produtos da hidratação, mas de forma mais lenta, diminuindo a velocidade das reações (fase de desaceleração). Assim, podemos identificar que nos



concretos de resistência normal (classe C35), o período de indução ocorre até as primeiras 5 horas de ensaio, o período de aceleração ocorre entre 5 e 20 horas e o período de desaceleração acontece de 20 horas até 3 dias de ensaio, que é o momento em que os concretos atingem a elevação adiabática de temperatura máxima. Já os concretos de alta resistência apresentam essas fases em momentos distintos aos da classe de resistência normal, ou seja, o período de indução ocorre durante as primeiras 10 horas de ensaio, o período de aceleração ocorre entre 10 e 30 horas e o período de desaceleração ocorre entre as 30 horas até a estabilização da curva (cerca de 3 dias).

O modelo proposto por WALLER (1999) e apresentado na revisão da literatura foi aplicado para os dez concretos desse estudo. Os valores calculados para capacidade térmica, grau de hidratação final do cimento, calor de hidratação do concreto e da elevação adiabática de temperatura prevista são mostrados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 – Capacidade térmica, grau de hidratação final do cimento, calor de hidratação do concreto e elevação adiabática máxima prevista pelo modelo proposto por WALLER (1999) para todos os concretos**

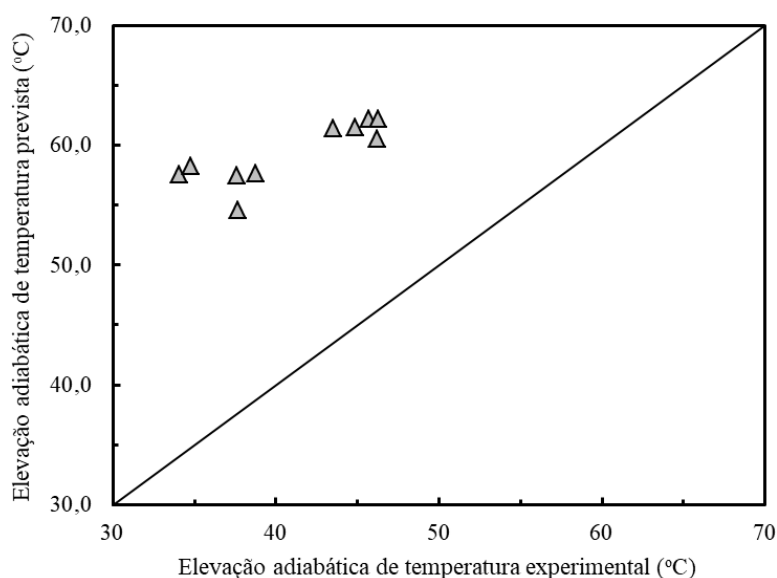
Misturas	Capacidade térmica (kJ/°C/m <sup>3</sup> )	Grau de hidratação final do cimento	Calor de hidratação do concreto (kJ/m <sup>3</sup> )	Elevação adiabática de temperatura prevista (°C)
<b>C35-NAT</b>	2465	0,86	134588	54,6
<b>C35-L-B0</b>	2394	0,85	137737	57,5
<b>C35-L-B1</b>	2375	0,85	136477	57,5
<b>C35-D-B0</b>	2385	0,84	138861	58,2
<b>C35-D-B1</b>	2404	0,85	138546	57,6
<b>C60-NAT</b>	2332	0,66	141043	60,5
<b>C60-L-B0</b>	2255	0,64	140150	62,1
<b>C60-L-B1</b>	2231	0,63	138787	62,2
<b>C60-D-B0</b>	2228	0,61	136752	61,4
<b>C60-D-B1</b>	2251	0,62	138442	61,5

A capacidade térmica do concreto é calculada com base na capacidade térmica de cada um dos seus constituintes. Como o modelo não fornecia a capacidade térmica dos agregados reciclados, foi adotado o mesmo valor para todos os agregados graúdos. Nota-se que os concretos da classe C35 apresentaram valores maiores para a capacidade térmica. De fato, como a água apresenta o maior valor de capacidade térmica entre todos os materiais e os concretos da classe C35 apresentavam maior quantidade de água livre em sua composição, esse resultado já era esperado.

Conforme visto na revisão da literatura, o cimento não consegue alcançar 100% de hidratação. Isso ocorre pela formação de uma camada de hidratos ao redor dos grãos de cimento que impedem o contato entre a água e o cimento anidro. Assim, os valores de grau de hidratação final do cimento para cada uma das misturas é mostrado na Tabela 5.3. É possível observar que os concretos da classe de resistência normal atingem graus de hidratação maiores que os concretos de alta resistência. Isso se deve pela maior disponibilidade de água livre para a hidratação de uma quantidade menor de grãos de cimento, ou seja, concretos com maiores valores de fator água/cimento efetivo tendem a apresentar maior proporção de grãos de cimento hidratados ao final do processo do que misturas com relação água/cimento baixa.

Já o calor de hidratação do concreto considera o calor liberado por cada componente do cimento. Esses componentes são calculados a partir da fórmula de Bogue. Nota-se que, apesar dos concretos de alta resistência apresentarem um grau de hidratação final menor que as misturas de resistência normal, sua maior quantidade de cimento provoca uma maior liberação de calor pelas reações de hidratação. Assim, os concretos da classe C60 apresentam valores maiores de calor de hidratação do que os concretos da classe C35.

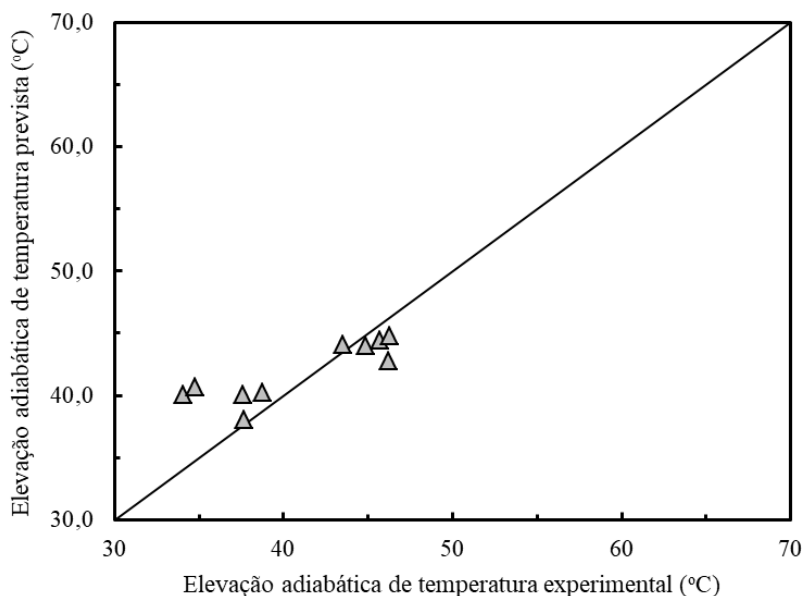
Dessa forma, uma previsão da elevação adiabática de temperatura foi feita com base nesse modelo. Ela é dada pela razão entre o calor de hidratação do concreto e sua capacidade térmica. A Figura 5.7 apresenta a relação entre os resultados experimentais e os previstos pelo modelo de WALLER (1999).



**Figura 5.7 – Relação entre os resultados de elevação adiabática de temperatura experimentais e os valores previstos pelo modelo de WALLER (1999)**

É possível notar que os valores estimados pelo modelo são maiores que os obtidos experimentalmente. Alguns fatores podem ter contribuído para essa superestimativa, como por exemplo, os valores adotados para a capacidade térmica dos materiais constituintes dos concretos e o cálculo dos componentes do cimento através da fórmula de Bogue. Diferentes autores já confirmaram que a composição de Bogue é um método bastante limitado e distante das condições reais de produção dos clínqueres industriais, pois apresenta grandes desvios, especialmente para o  $C_3S$ , cujos resultados são imprecisos e duvidosos (TAYLOR, 1992; GOBBO, 2003; COSTA, 2013).

Dessa forma, verificou-se que os resultados experimentais obtidos eram equivalentes a 70% dos valores previstos pelo modelo de WALLER (1999). Assim, ajustou-se a Equação (5.11) com um fator multiplicativo igual a 0,7. Os resultados desse ajuste são mostrados na Figura 5.8.



**Figura 5.8 – Ajuste do modelo de WALLER (1999) para os resultados experimentais desse estudo**

Por fim, foram utilizados os valores de grau de hidratação do cimento da Tabela 5.3 para calcular a evolução da hidratação dos concretos no tempo, com base na elevação adiabática de temperatura. Essas curvas são mostradas na Figura 5.9. Nota-se que durante todo o ensaio, os concretos da classe C35 apresentaram grau de hidratação do cimento maior que os concretos da classe C60. Isso mostra que a maior disponibilidade de água para as reações de hidratação fez com que esse comportamento ocorresse. Esse

resultado pode parecer contraditório quando relacionamos com o comportamento mecânico dos concretos, visto que a maior quantidade de água livre prejudica a resistência à compressão dos concretos. Porém, também deve ser considerado que os concretos com menor água livre apresentam maior quantidade de cimento em sua composição. Assim, por mais que o grau de hidratação final do cimento seja menor para essas misturas, existe uma maior quantidade de produtos de hidratação formados que garantem maior resistência ao concreto.

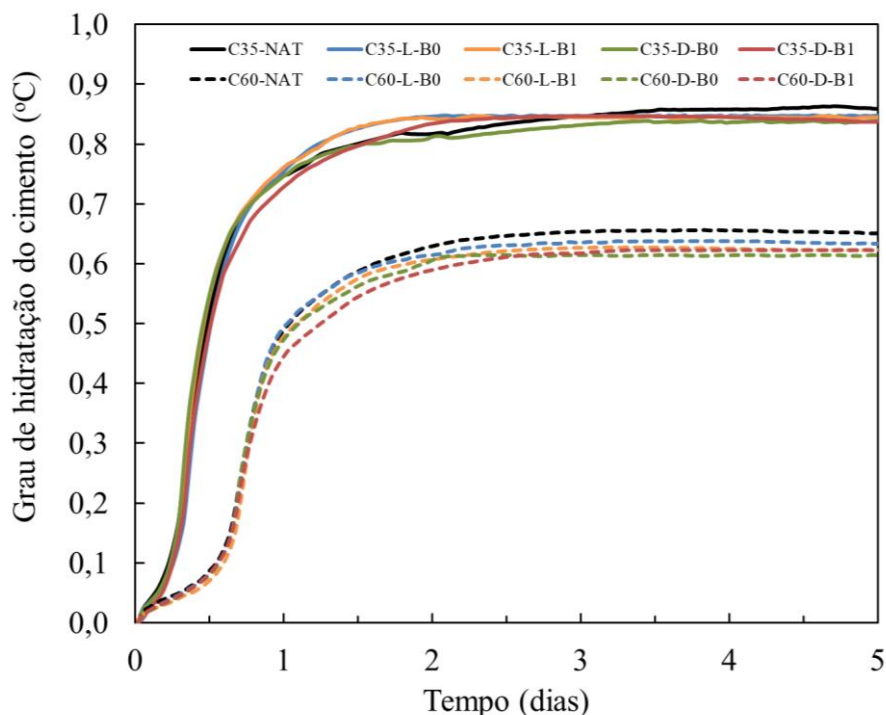


Figura 5.9 – Grau de hidratação do cimento no tempo de todos os concretos

#### 5.4. Conclusões do capítulo

Portanto, esse capítulo apresentou os resultados experimentais do desenvolvimento do processo de hidratação em concretos reciclados, através do ensaio de elevação adiabática de temperatura. As principais conclusões desse capítulo são listadas a seguir:

- Nas primeiras horas de ensaio, os concretos de resistência normal apresentaram uma maior liberação de calor absoluta que os concretos de alta resistência. Porém, ao final do ensaio, os concretos da classe C60 liberam maior quantidade de calor acumulado durante o processo de hidratação. Isso está relacionado principalmente ao fato de que

concretos com menores valores de fator água/cimento e maiores consumos de cimento apresentam maior desprendimento de calor provocado pelas reações exotérmicas.

- Além disso, nas curvas normalizadas de elevação adiabática, foi observado que após 10 horas do início do ensaio, os concretos de alta resistência atingiram apenas 10% da elevação adiabática máxima, enquanto os concretos de resistência normal haviam atingido cerca de 55% da elevação adiabática máxima. Isso mostra que o processo de hidratação nas misturas de alta resistência é mais lento nas primeiras horas de ensaio. Apesar disso, após 100 horas, todos os concretos já tinham alcançado 100% da sua elevação adiabática máxima.

- Foi observada uma relação entre a fração granulométrica e a elevação adiabática de temperatura para os concretos de resistência normal com brita 0 reciclada. Esse fato pode estar associado à capacidade térmica dos agregados reciclados, mas essa questão ainda necessita de um maior entendimento.

- Não foi observada nenhuma relação entre a origem dos agregados reciclados e o comportamento dos concretos durante o ensaio de elevação adiabática de temperatura. O método de dosagem científica adotado, aliado a uma adequada compensação de água de absorção dos agregados reciclados foram fundamentais para que as propriedades da pasta de cimento fossem mantidas constantes entre todos os concretos de cada classe de resistência.

- Os coeficientes de elevação adiabática dos concretos da classe C60 foram relativamente menores que os obtidos para a classe C35. Esse fato foi atribuído ao maior número de grãos a serem hidratados nas misturas com maior consumo de cimento e com uma menor quantidade de água disponível para a hidratação (baixos água/cimento), fazendo com que uma parte deles permaneça anidro, liberando menos calor por massa de cimento.

- O modelo proposto por WALLER (1999) não demonstrou uma boa previsão dos valores de elevação adiabática dos concretos desse estudo. Esse modelo utiliza os valores da composição de Bogue para definir cada fase presente no clínquer. Porém, alguns autores questionam a precisão desse método para a determinação da composição dos clínqueres industriais que já se mostrou bastante duvidoso e limitado, principalmente em relação ao C<sub>3</sub>S. Assim, foi proposto um fator para ajuste do modelo que melhor se adequou aos resultados experimentais obtidos.

- Por fim, as curvas de grau de hidratação do cimento ao longo do tempo mostraram que os concretos da classe C35 apresentaram grau de hidratação do cimento maior que os concretos da classe C60 durante todo o ensaio. Isso ocorreu devido a uma maior disponibilidade de água livre para a hidratação de uma quantidade menor de grãos de cimento, ou seja, concretos com maiores valores de fator água/cimento efetivo tendem a apresentar maior proporção de grãos de cimento hidratados ao final do processo do que misturas com relação água/cimento baixa. Apesar disso, em misturas com baixos valores de água/cimento, a maior quantidade de cimento também proporciona a formação de uma quantidade maior de produtos de hidratação, que conferem maior resistência mecânica a esses concretos.

## *Capítulo 6*

# *Retração autógena e retração por secagem em concretos reciclados*

### *6.1. Revisão da literatura*

A retração é um fenômeno definido como a redução de volume ou deformação do concreto devido à perda de água por evaporação ou por reações de hidratação do cimento. A retração total é composta pela retração plástica, retração autógena e retração por secagem (NEVILLE, 1995).

A retração plástica ocorre ainda no estado fresco devido, principalmente, a evaporação rápida de água ou sucção de água pelas formas, provocando o surgimento de fissuras na superfície do concreto. Assim, seu controle deve ser realizado durante a cura inicial do concreto, através de cuidados com a temperatura e a umidade relativa do ar após a moldagem (HEWLETT, 2003).

A retração autógena e a retração por secagem em concretos convencionais e em concretos reciclados serão explicadas com mais detalhes nos itens a seguir.

#### *6.1.1. Retração autógena em concretos*

A retração autógena é causada pela saída de água dos poros capilares para a formação dos produtos de hidratação do cimento, gerando uma contração de volume da pasta de cimento, sem perda de água para o ambiente. Esta é uma propriedade muito importante em concretos de alto desempenho, devido ao baixo fator a/c e ao elevado consumo de cimento.

O período mais crítico das deformações por retração autógena ocorre nas primeiras 24 horas após o contato com a água. Durante esse período, a resistência à tração dos concretos é muito baixa para resistir à propagação das microfissuras geradas pela

retração do concreto (WU *et al.*, 2017). Caso essas fissuras apareçam de forma não controlada, elas poderão prejudicar a durabilidade da estrutura.

A retração autógena é um fenômeno bastante complexo, influenciado por diferentes fatores, como tipo e finura do cimento, relação água/cimento, uso de aditivos químicos e processo de cura. Ainda não há um mecanismo claro que explique como ocorre a retração autógena, mas a teoria mais bem aceita atualmente é o da tensão capilar.

Nessa teoria, a retração autógena ocorre devido ao surgimento de uma pressão interna na superfície dos poros, provocada pela mudança de saturação desses poros, que deixam de estar saturados com água para a condição insaturada. Essa água livre é reduzida gradualmente devido as reações de hidratação do cimento e, conseqüentemente, a condição de umidade interna também se reduz. Assim, a fim de restaurar a pressão de equilíbrio na superfície dos poros, surge uma tensão capilar que é responsável por gerar a retração do concreto (WU *et al.*, 2017).

Assim, torna-se claro que a estrutura de poros tem um papel importante na retração autógena de concretos. Essa estrutura está relacionada principalmente a relação água/cimento da mistura e as condições de umidade interna. Para ZHANG *et al.* (2003), concretos com relações água/cimento altas apresentam redução bem lenta da umidade relativa interna, de forma que as tensões capilares se tornam fracas e não são suficientes para provocar grandes deformações por retração autógena. Por outro lado, em misturas com baixos valores de fator água/cimento, as reações de hidratação provocam a saída de água de poros menores, que ocasionam uma redução rápida da umidade relativa interna do material e conseqüentemente, surgem tensões capilares altas, fazendo com que a retração autógena desses concretos seja mais elevada.

Nesse contexto, estudos têm sido realizados com o objetivo de utilizar a maior porosidade de determinados agregados como reservatórios para a cura interna de concretos. De acordo com JENSEN & LURA (2006), para ocorrer a cura interna em materiais cimentícios, é necessário que dois requisitos sejam atendidos: umidade relativa próxima a 100% e disponibilidade de transporte de água do reservatório (no caso, do agregado poroso) para todas as regiões onde ocorrerão as reações de hidratação do cimento. Dessa forma, a água seria liberada gradativamente dos poros dos agregados, tornando a diminuição da umidade interna mais lenta e amenizando a magnitude das tensões capilares e da retração autógena desses concretos.



Para LIU *et al.* (2017), a cura interna pode reduzir efetivamente o início e o final da retração autógena de concretos de alta resistência após o início da pega, independente do tipo de cimento utilizado. Além disso, para os autores, o tipo, a composição e o tamanho do agregado poroso utilizado podem afetar a eficácia da cura interna.

GONZALEZ-COROMINAS & ETXEBERRIA (2016) investigaram a influência da qualidade do concreto de origem na retração autógena de concretos reciclados. Foram utilizados agregados reciclados de três concretos de origem (40, 60 e 100 MPa). De acordo com os resultados obtidos, a retração autógena dos concretos foi menor para as misturas produzidas com agregados reciclados de menor qualidade (e consequentemente, maior porosidade) e em maior teor de substituição. Esses resultados demonstram que, provavelmente, a elevada capacidade dos agregados reciclados de menor qualidade de armazenar água em seu interior foi capaz de reduzir as deformações autógenas.

MEDJIGBODO *et al.* (2018) também obtiveram valores menores para retração autógena de concretos reciclados, em comparação com os concretos naturais. Nesse estudo, a retração autógena de concretos com substituição parcial da fração grávida por agregados reciclados foi aproximadamente 50% menor que em concretos convencionais, enquanto a retração em concreto cuja fração grávida era integralmente reciclada foi considerada desprezível. Isso também foi atribuído a capacidade de cura interna gerada pelos agregados reciclados. Resultados semelhantes foram obtidos por MARUYAMA & SATO (2005), onde a retração autógena de concretos reciclados de alta resistência foi 40% menor que a do concreto de referência correspondente.

Portanto, esses são alguns dos estudos disponíveis na literatura que tratam diretamente da retração autógena. Conforme visto, essa propriedade é mais crítica em concretos de alta resistência. Por isso, geralmente os estudos em concretos de resistência normal não avaliam essa propriedade separadamente; a maior parte desses estudos apresenta esses resultados juntamente com as deformações por secagem.

### **6.1.2. Retração por secagem em concretos**

A retração por secagem ocorre devido à evaporação de água dos poros capilares provocada pela baixa umidade relativa do ambiente. Estas condições induzem ao transporte de partículas de água do C-S-H para os poros capilares que posteriormente,

sofrem a evaporação. A retração por secagem produz uma tensão interna, perda de massa e, conseqüentemente, redução no volume do concreto (HEWLETT, 2003). Esse mecanismo é semelhante ao descrito pela retração autógena, onde ao invés da água sair dos poros para agir nas reações de hidratação, ela sai dos poros para a evaporação.

Muitos fatores afetam esta propriedade do concreto. De acordo com a ACI 209.1R (2005), entre eles estão incluídos o tipo e a finura do cimento, o tipo e o tamanho do agregado utilizado, o fator água/cimento, a umidade relativa, o tempo de cura e as dimensões e forma da amostra de concreto. No caso da utilização de agregados reciclados, sua maior influência é no aumento da porosidade total do concreto. Diferentes estudos disponíveis na literatura associam essa alta porosidade a obtenção de maiores deformações por retração por secagem, em comparação com concretos produzidos somente com agregados naturais.

KOU & POON (2015) e GHOLAMPOUR & OZBAKKALOGLU (2018) avaliaram a influência da qualidade do concreto de origem dos agregados reciclados na retração por secagem de concretos produzidos com estes agregados. Para isso, foram utilizados concretos de origem com resistência à compressão aos 28 dias variando de 30 a 100 MPa no primeiro estudo e entre 20 e 110 MPa no segundo estudo. Ambos os autores tiveram resultados semelhantes, onde o concreto reciclado com o maior valor de retração por secagem foi a mistura produzida com agregados do concreto de origem de menor resistência. Para os autores, este fato está associado a maior absorção de água que o agregado produzido, a partir do concreto de origem de menor resistência, apresenta. Assim, concretos produzidos com agregados de melhor qualidade apresentam valores de retração mais similares aos de concretos com agregados naturais.

GONZALEZ-COROMINAS & ETXEBERRIA (2016) também investigaram a influência da qualidade do concreto de origem (resistência à compressão de 40, 60 e 100 MPa) na retração de concretos reciclados. De acordo com os resultados obtidos pelos autores, a menor qualidade dos agregados reciclados juntamente com as maiores taxas de substituição deste material provocaram um aumento na retração por secagem dos concretos reciclados. Para os autores, a retração por secagem está relacionada ao módulo de elasticidade do concreto, assim, quanto menor é o módulo de elasticidade do concreto, maior é a retração por secagem.

YANG & LIM (2018) utilizaram agregados reciclados de resíduo de concreto de pavimentação para a produção de concretos reciclados, dosados pelo método EMV (volume equivalente de argamassa). Os resultados desses autores mostraram que, aos 54 dias de idades, os concretos reciclados apresentaram valores menores de retração por secagem que os concretos naturais. Os autores atribuem esses resultados a boa qualidade do concreto de origem e ao método de dosagem utilizado, visto que a quantidade de argamassa aderida aos grãos promove uma redução do volume de argamassa da composição dos concretos reciclados.

Assim como visto nos estudos de retração autógena, alguns autores avaliaram o potencial dos agregados reciclados de armazenarem água em seu interior e contribuírem para a cura interna, reduzindo assim a retração por secagem do concreto.

YILDIRIM *et al.* (2015) estudaram a capacidade do agregado reciclado de ser um reservatório natural de umidade para a cura interna do concreto. Para os autores, a interface agregado-pasta de cimento é melhor em concretos reciclados do que em concretos naturais. Os resultados deste estudo mostraram que os concretos contendo agregados miúdos reciclados com pré-saturação de 50% obtiveram comportamento semelhante ao de concretos naturais, principalmente após um longo período de ensaio. Os autores atribuíram esses resultados a cura interna promovida pelos agregados reciclados e a granulometria contínua apresentada por eles, que podem ter contribuído para reduzir os valores de retração por secagem.

Ainda considerando o efeito da cura interna, SEARA-PAZ *et al.* (2016) avaliaram a influência da condição de umidade inicial dos agregados reciclados na retração de concretos reciclados. Para os autores, o uso de agregados reciclados na condição saturado superfície seca retardou o desenvolvimento da retração nos concretos. Porém, a cura interna não foi suficiente para evitar que os concretos reciclados estudados apresentassem valores de retração maiores que o concreto natural em idades avançadas.

Portanto, esses são alguns dos resultados disponíveis na literatura sobre a influência da utilização de agregados reciclados de resíduos de concreto na retração por secagem de concretos reciclados. Conforme visto, essa propriedade tem um maior destaque em concretos de resistência normal, pois eles apresentam maiores valores de porosidade que os concretos de alta resistência. A cura interna pode ser utilizada principalmente para reduzir a retração por secagem nas primeiras idades, mas essa diminuição está mais

associada à redução dos valores de retração autógena que ocorrem simultaneamente ao desenvolvimento da secagem dos concretos do que a retração por secagem em si.

### **6.1.3. Retração total em concretos**

Em geral, a retração total do concreto é dada pela soma dos efeitos de retração autógena e de retração por secagem. Conforme visto nessa revisão da literatura, estudos mostraram que a utilização de agregados reciclados pode promover uma redução nos valores de retração autógena e um aumento da retração por secagem de concretos reciclados, em comparação aos concretos contendo somente agregados naturais. Dessa forma, o efeito final da utilização desses agregados altamente porosos vai depender da magnitude dos efeitos individuais em cada uma dessas duas propriedades.

Alguns estudos mostram que a utilização de agregados reciclados tende a aumentar a retração total dos concretos reciclados em comparação com o concreto natural (MANZI *et al.*, 2013, TAM, 2015; GONZALEZ-COROMINAS & ETXEBERRIA, 2016). SILVA *et al.* (2015b) selecionaram e sintetizaram dados experimentais de diferentes publicações de estudos já realizados para avaliar o efeito da incorporação de agregados reciclados na retração total de concretos. Nesta revisão da literatura, os autores concluíram que conforme o teor de agregado reciclado aumentava nas misturas, maior era a retração total dos concretos reciclados. Porém, este comportamento pode estar mais relacionado à qualidade do concreto de origem do agregado, do que à quantidade de agregado reciclado presente na mistura. Além disso, a utilização de um método de compensação de água pode reduzir até 30% da retração total de concretos, em comparação com concretos contendo agregados reciclados pré-saturados.

O efeito da cura interna na retração autógena pode compensar os efeitos negativos da dessa elevada porosidade provocada pelos agregados reciclados na retração por secagem. Porém, devem ser considerados outros métodos para reduzir das deformações provocadas pela evaporação de água, principalmente em ambiente com umidade relativa baixa. O tipo, a composição e o tamanho dos grãos do agregado reciclado podem afetar a eficiência da cura interna.

Segundo LIU *et al.* (2017), em concretos reciclados de alta resistência, a retração total pode ser significativamente menor que a de concretos naturais, pois, nesses concretos, os efeitos provocados pela retração autógena são mais pronunciados. De fato, a cura

interna é capaz de reduzir efetivamente a deformações iniciais e de longa duração de concretos de alto desempenho. Em relação à retração por secagem, quanto maior é a incorporação de água, maior é a deformação pela evaporação dessa água. No entanto, a soma desses dois efeitos promove uma redução na retração total dos concretos.

#### **6.1.4. Modelos de previsão da retração em concretos**

Existem alguns modelos para a previsão da retração em concretos. Nenhum deles, porém, é destinado para a previsão do comportamento de concretos com agregados reciclados.

Nos itens a seguir serão apresentados os principais modelos de previsão, separados em modelos que consideram a retração autógena e a retração por secagem separadamente e os modelos que calculam diretamente a retração total.

Entre eles estão o FIB MODEL CODE (2010), EUROCODE 2 (2004), BAZANT-BAWEJA B3 (1995), CEP-FIP 90 (1990), GL2000 (2001) e ACI 209R-08 (2008). Todos esses modelos seguem basicamente os mesmos princípios: a previsão da curva que representa o valor final de retração depende de fatores como condições de cura, umidade relativa, resistência do concreto e dados da composição das misturas.

##### *6.1.4.1. Modelos para previsão da retração autógena em concretos*

###### FIB MODEL CODE (2010)

A previsão da retração autógena em concretos pelo FIB MODEL CODE (2010) é dada pela Equação (6.1):

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{cas0}(f_{cm}) \cdot \beta_{as}(t) \quad (6.1)$$

Onde:

$\varepsilon_{cas}(t)$  é a retração autógena no tempo  $t$ ;

$\varepsilon_{cas0}(f_{cm})$  é o coeficiente de retração autógena, dado pela Equação (6.2);

$\beta_{as}(t)$  é a função do tempo, dada pela Equação (6.3).

$$\varepsilon_{cas0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \cdot \left( \frac{f_{cm}/10}{6 + f_{cm}/10} \right)^{2,5} \cdot 10^{-6} \quad (6.2)$$

Onde:

$\alpha_{as}$  é um coeficiente dependente do tipo de cimento (Tabela 6.1);

$f_{cm}$  é resistência à compressão média aos 28 dias.

**Tabela 6.1 – Valores para o coeficiente  $\alpha_{as}$  do modelo FIB MODEL CODE (2010)**

Classe de resistência do cimento	$\alpha_{as}$
32,5 N	800
32,5 R; 42,5 N	700
42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	600

Por fim, a função do tempo é dada pela Equação (6.3):

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot \sqrt{t}) \quad (6.3)$$

#### EUROCODE 2 (2004)

A previsão da retração autógena em concretos pelo EUROCODE 2 (2004) é dada pela Equação (6.4):

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (6.4)$$

Onde:

$\varepsilon_{ca}(t)$  é a retração autógena no tempo  $t$ ;

$\beta_{as}(t)$  é a função do tempo, dada pela Equação (6.5);

$\varepsilon_{ca}(\infty)$  é o coeficiente de retração autógena, quando  $t \rightarrow \infty$ , dado pela Equação (6.6).

A função do tempo é dada pela Equação (6.5) e o coeficiente de retração autógena é dado pela Equação (6.6):

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 t^{0,5}) \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (6.6)$$

Onde:

$f_{ck}$  é a resistência à compressão característica do concreto aos 28 dias.

#### 6.1.4.2. Modelos para previsão da retração por secagem em concretos

##### FIB MODEL CODE (2010)

A previsão de retração por secagem em concretos pelo FIB MODEL CODE (2010) é dada pela Equação (6.7):

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \quad (6.7)$$

Onde:

$\varepsilon_{cds}(t, t_s)$  é a retração por secagem no tempo  $t$ ;

$t$  é a idade do concreto em dias;

$t_s$  é a idade do concreto no início do ensaio da secagem;

$(t, t_s)$  é a duração da secagem em dias;

$\varepsilon_{cds0}(f_{cm})$  é o coeficiente de retração por secagem, dado pela Equação (6.8)(6.2);

$\beta_{RH}(RH)$  é uma constante dependente da umidade relativa (RH) do ambiente de secagem, dada pela Equação (6.9);

$\beta_{ds}(t - t_s)$  é a função do tempo, dada pela Equação (6.11).

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \cdot 10^{-6} \quad (6.8)$$

Onde:

$\alpha_{ds1}$  e  $\alpha_{ds2}$  são coeficientes dependentes do tipo de cimento (Tabela 6.2).

**Tabela 6.2 - Valores para o coeficiente  $\alpha_{ds1}$  e  $\alpha_{ds2}$  do modelo FIB MODEL CODE (2010)**

Classe de resistência do cimento	$\alpha_{ds1}$	$\alpha_{ds2}$
32,5 N	3	0,013
32,5 R; 42,5 N	4	0,012
42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	6	0,012

O coeficiente  $\beta_{RH}(RH)$  pode ser calculado de acordo com a Equação (6.9):

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100} \right)^3 \right] & \text{para } 40 \leq RH \leq 99\% \cdot \beta_{s1} \\ 0,25 & \text{para } RH \geq 99\% \cdot \beta_{s1} \end{cases} \quad (6.9)$$

Onde:

$\beta_{s1}$  é dado pela Equação (6.10):

$$\beta_{s1} = \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,1} \leq 1,0 \quad (6.10)$$

Por fim, a função do tempo  $\beta_{ds}(t - t_s)$  é dada pela Equação (6.11):

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left( \frac{(t - t_s)}{0,035 \cdot h^2 + (t - t_s)} \right)^{0,5} \quad (6.11)$$

### EUROCODE 2 (2004)

A previsão da retração por secagem em concretos pelo EUROCODE 2 (2004) é dada pela Equação (6.12):

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (6.12)$$

Onde:

$\varepsilon_{cd}(t)$  é a retração por secagem no tempo  $t$ ;

$\beta_{ds}(t, t_s)$  é uma função do tempo, dada pela Equação (6.13);

$k_h$  é um coeficiente dependente das dimensões da amostra, representado por  $h_0$  (Equação (6.14));

$\varepsilon_{cd,0}$  representa o valor nominal de retração por secagem, dado pela Tabela 6.4.



$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}} \quad (6.13)$$

$$h_0 = 2 A_c/u \quad (6.14)$$

Onde:

$A_c$  é a área da seção transversal;

$u$  é o perímetro da parte da seção transversal exposta a secagem.

Assim, o coeficiente  $k_h$  pode ser obtido pela Tabela 6.3:

**Tabela 6.3 – Valores do coeficiente  $k_h$  de acordo com EUROCODE (2004)**

$h_0$	$k_h$
<b>100</b>	1,00
<b>200</b>	0,85
<b>300</b>	0,75
<b>≥ 500</b>	0,70

Por fim, os valores nominais de retração por secagem podem ser obtidos da Tabela 6.4.

**Tabela 6.4 – Valores nominais de retração por secagem para concretos com cimento CEM Class N, de acordo com o EUROCODE (2004)**

$f_{ck}/f_{ck,cubo}$ (MPa)	Umidade relativa (%)					
	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>
<b>20/25</b>	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
<b>40/50</b>	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
<b>60/75</b>	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
<b>80/95</b>	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
<b>90/105</b>	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

#### 6.1.4.3. Modelos para previsão da retração total em concretos

A previsão da retração total em concretos pelo FIB MODEL CODE (2010) E EUROCODE (2004) é dada pela soma das previsões de retração autógena e por secagem de cada um dos modelos.

Na literatura, é possível encontrar modelos que consideram somente a retração total do concreto, sem diferenciar que parcelas representam as deformações autógenas e as deformações por secagem. Alguns deles são apresentados a seguir:

BAZANT-BAWEJA B3 (1995)

A retração total em concretos pode ser estimada pelo Modelo de BAZANT-BAWEJA B3 (1995), através da Equação (6.15):

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = -\varepsilon_{sh\infty} \cdot k_h \cdot S(t - t_c) \quad (6.15)$$

Onde:

$\varepsilon_{sh}(t, t_c)$  é a retração total do concreto no tempo  $t$ ;

$\varepsilon_{sh\infty}$  é retração no tempo infinito, dada pela Equação (6.16);

$k_h$  é um coeficiente dependente umidade relativa;

$S(t - t_c)$  é a curva da função do tempo

Assim,  $\varepsilon_{sh\infty}$  é dado pela Equação (6.16):

$$\varepsilon_{sh\infty} = -\varepsilon_{s\infty} \frac{E_{cm607}}{E_{cm(t_c+\tau_{sh})}} \quad (6.16)$$

Onde:

$\varepsilon_{s\infty}$  é uma constante dada pela Equação (6.17);

$\frac{E_{cm607}}{E_{cm(t_c+\tau_{sh})}}$  é um fator referente ao módulo de elasticidade que considera a retração última em função do tempo, dada pela Equação (6.18);

$$\varepsilon_{s\infty} = -\alpha_1 \alpha_2 [0,019 \cdot w^{2,1} \cdot f_{cm28}^{-0,28} + 270] \cdot 10^{-6} \quad (6.17)$$

Onde:

$\alpha_1$  é uma constante em função do tipo de cimento, dado pela Tabela 6.5;

$\alpha_2$  é uma constante em função do tipo de cura, dado pela Tabela 6.6

$w$  é a quantidade de água em kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 6.5 – Valores de  $\alpha_1$  de acordo com o modelo BAZANT-BAWEJA B3 (1995)

Tipo de cimento	$\alpha_1$
Tipo I	1,00
Tipo II	0,85
Tipo III	1,10

Tabela 6.6 – Valores de  $\alpha_2$  de acordo com o modelo BAZANT-BAWEJA B3 (1995)

Tipo de cura	$\alpha_2$
Cura térmica	0,75
Cura em água ou com 100% de umidade relativa	1,00
Selado durante a cura ou cura ao ar com proteção inicial contra a secagem	1,20

$$E_{cmt} = E_{cm28} \left( \frac{t}{4 + 0,85t} \right)^{0,5} \quad (6.18)$$

O fator  $k_h$  pode ser obtido através das equações apresentadas na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Equações para cálculo de  $k_h$  do modelo BAZANT-BAWEJA B3 (1995)

Umidade relativa	$k_h$
$h \leq 0,98$	$1 - h^3$
$h = 1,00$	-0,2
$0,98 < h < 1,00$	$12,74 - 12,94h$

Por fim, para o cálculo de  $S(t - t_c)$  utiliza-se a Equação (6.19):

$$S(t - t_c) = \tanh \sqrt{\frac{(t - t_c)}{\tau_{sh}}} \quad (6.19)$$

O fator  $\tau_{sh}$  é uma constante dependente das dimensões do concreto e pode ser calculado pela Equação (6.20).

$$\tau_{sh} = 0,085 \cdot t_c^{-0,08} \cdot f_{cm28}^{-0,25} \cdot [2 k_s(V/S)]^2 \quad (6.20)$$

De acordo com os autores, pode-se utilizar uma boa aproximação para  $k_s$  igual a 1,0, visando simplificar os cálculos.

CEP-FIP 90 (1990)

A retração total em concretos pode ser estimada pelo Modelo CEP-FIP 90 (1990), através da Equação (6.21):

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (6.21)$$

Onde:

$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$  é a retração total do concreto no tempo  $t$ ;

$\varepsilon_{cs0}$  é o coeficiente de retração, dado pela Equação (6.22);

$\beta_s(t - t_s)$  é um coeficiente que descreve o desenvolvimento da retração de acordo com o tempo da secagem.

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \quad (6.22)$$

Onde  $\varepsilon_s(f_{cm})$  é dado pela Equação (6.23) e  $\beta_{RH}$  pela Equação (6.24).

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/f_{cmo})] \cdot 10^{-6} \quad (6.23)$$

O coeficiente  $\beta_{sc}$  depende do tipo de cimento utilizado. Seu valor é obtido pela Tabela 6.8.

**Tabela 6.8 – Coeficiente  $\beta_{sc}$  de acordo com o tipo de cimento pelo modelo CEP-FIP 90 (1990)**

Tipo de cimento	$\beta_{sc}$
SL	4
N e R	5
RS	8

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h}{h_0} \right)^3 \right] & \text{para } 0,4 \leq h \leq 0,99 \\ 0,25 & \text{para } h \geq 0,99 \end{cases} \quad (6.24)$$

Por fim, o desenvolvimento da retração no tempo  $\beta_s(t - t_s)$  pode ser calculado pela Equação (6.25).

$$\beta_s(t - t_s) = \left[ \frac{(t - t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0,5} \quad (6.25)$$

Onde:

$t_1$  é o tempo de 1 dia;

$h_0$  é igual a 100 mm;

$h = 2A_c/u$ .

### GL2000 (2001)

A retração total em concretos pode ser prevista pelo modelo GL2000, proposto por GARDNER & LOCKMAN (2001), através da Equação (6.26):

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{shu} \cdot \beta(h) \cdot \beta(t) \quad (6.26)$$

Onde:

$\varepsilon_{sh}$  é a retração total do concreto;

$\varepsilon_{shu}$  é um coeficiente dependente do tipo de cimento e da resistência do concretos, dado pela Equação (6.27);

$\beta(h)$  é um fator dependente da umidade do ambiente de ensaio, dado pela Equação (6.28);

$\beta(t)$  é a função do tempo de ensaio.

$$\varepsilon_{shu} = 900 \cdot K \cdot \left( \frac{30}{f_{cm28}} \right)^{1/2} \cdot 10^{-6} \quad (6.27)$$

Onde:

$K=1,0$  para cimento tipo I,  $K=0,75$  para cimento tipo II e  $K=1,15$  para cimento tipo III.

$$\beta(h) = (1 - 1,18 \cdot h^4) \quad (6.28)$$

Onde:

$h$  é a umidade do ambiente de ensaio.

Por fim, a função do tempo  $\beta(t)$  é dada pela Equação (6.29):

$$\beta(t) = \left( \frac{t - t_c}{t - t_c + 0,12 \cdot (V/S)^2} \right)^{0,5} \quad (6.29)$$

Onde:

$t$  é a idade do concreto;

$t_c$  é o tempo de ensaio;

$V/S$  é a relação entre o volume e a área superficial da amostra de concreto.

#### ACI 209R-08 (2008)

A retração total em concretos pode ser calculada pelo modelo ACI 209R-08 (2008), através da Equação (6.30):

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t - t_c)^\alpha}{f + (t - t_c)^\alpha} \cdot \varepsilon_{shu} \quad (6.30)$$

Onde:

$\varepsilon_{sh}(t, t_c)$  é a retração total do concreto;

$t$  é a idade do concreto;

$t_c$  é o tempo de ensaio;

$\alpha$  é uma constante que considera a forma e as dimensões do concreto e pode ser aproximada para 1,0;

$f$  é um outro coeficiente que também considera as dimensões da amostra e pode ser calculado através da Equação (6.31);

$\varepsilon_{shu}$  é um coeficiente para ajuste de fatores relativos ao ensaio e ao concreto, entre eles a forma e dimensões da amostra, o abatimento de tronco de cone e a umidade relativa do ambiente de ensaio.

$$f = 26 \cdot e^{\{1,42 \cdot 10^{-2}(V/S)\}} \quad (6.31)$$

Por fim, o coeficiente  $\varepsilon_{shu}$  é dado pela Equação (6.32):

$$\varepsilon_{shu} = 780 \cdot \gamma_{sh} \cdot 10^{-6} \quad (6.32)$$

Onde:

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \cdot \gamma_{sh,RH} \cdot \gamma_{sh,vs} \cdot \gamma_{sh,s} \cdot \gamma_{sh,\psi} \cdot \gamma_{sh,c} \cdot \gamma_{sh,\alpha};$$

$\gamma_{sh,tc}$  é um fator de correção para o tempo de cura do concreto antes do início do ensaio;

$\gamma_{sh,RH}$  é um fator de correção para a umidade relativa do ambiente de ensaio;

$\gamma_{sh,vs}$  é um fator de correção para a forma e dimensões das amostras;

$\gamma_{sh,s}$  é um fator de correção para o abatimento de tronco de cone;

$\gamma_{sh,\psi}$  é um fator de correção para o teor de agregados miúdos;

$\gamma_{sh,c}$  é um fator de correção para o consumo de cimento;

$\gamma_{sh,\alpha}$  é um fator de correção para o teor de ar aprisionado.

#### 6.1.4.4. *Análise crítica dos modelos para previsão da retração em concretos*

A Tabela 6.9 apresenta um resumo dos principais fatores que são considerados em cada um dos modelos citados para previsão da retração em concretos.

A principal desvantagem da utilização desses modelos é o fato que nenhum deles foi desenvolvido para aplicação em concretos contendo agregados reciclados. Dessa forma, eles não consideram os possíveis efeitos da cura interna na retração final do concreto. Além disso, somente dois desses modelos são capazes de estimar a retração autógena e a retração por secagem separadamente.

Com exceção do modelo BAZANT BAWEJA B3, os modelos citados não consideram o efeito do módulo de elasticidade nas deformações do concreto. Apesar dessa propriedade estar relacionada diretamente com a resistência à compressão, ela não deve ser desprezada, principalmente para o caso dos concretos reciclados.

Ainda não há um consenso de qual desses modelos estima, com maior precisão, a retração final dos concretos. SILVA *et al.* (2015) aplicaram quatro dos modelos citados para a previsão de dados experimentais disponíveis na literatura. São eles: EUROCODE 2, BAZANT BAWEJA B3, GL 2000 e ACI 209R – 92. Para os autores, esses modelos tendem a superestimar os valores de retração final, principalmente para concretos naturais. De fato, essa conclusão parece bem contraditória, pois esses modelos foram

projetados especialmente para a previsão da retração de concretos convencionais. Os autores sugerem que talvez seja necessário realizar alguma calibração ou um ajuste nesses modelos, de forma a aumentar sua precisão.

**Tabela 6.9 – Resumo dos fatores que são considerados para a previsão dos modelos apresentados nesse capítulo**

Modelos	Tipo de retração	Fatores considerados em cada modelo
<b>FIB MODEL CODE 2010</b>	Retração autógena	Resistência à compressão média aos 28 dias – $f_{cm}$
		Classe de resistência do cimento – $\alpha_{as}$
	Retração por secagem	Resistência à compressão média aos 28 dias – $f_{cm}$
		Classe de resistência do cimento – $\alpha_{ds1}$ e $\alpha_{ds2}$
Umidade relativa do ambiente de ensaio – $RH$		
		Dimensões da amostra – $h=2A_c/u$
<b>EUROCODE 2</b>	Retração autógena	Resistência à compressão característica aos 28 dias – $f_{ck}$
	Retração por secagem	Dimensões da amostra – $h_0=2A_c/u$
		Cimento - Classe N
		Umidade relativa do ambiente de ensaio – $RH$
		Resistência à compressão característica aos 28 dias – $f_{ck}$
<b>BAZANT BAWEJA B3</b>	Retração total	Umidade relativa do ambiente de ensaio – $h$
		Tipo de cimento – $\alpha_1$
		Método de cura – $\alpha_2$
		Quantidade de água – $w$
		Resistência à compressão média aos 28 dias – $f_{cm}$
		Módulo de elasticidade do concreto – $E_{cm}$
		Forma e dimensões da amostra – $k_s$ e $V/S$
<b>CEB FIP 90</b>	Retração total	Resistência à compressão média aos 28 dias – $f_{cm}$
		Tipo de cimento – $\beta_{sc}$
		Umidade relativa do ambiente de ensaio – $RH$
		Dimensões da amostra – $h=2A_c/u$



Modelos	Tipo de retração	Fatores considerados em cada modelo
<b>GL 2000 (GARDNER AND LOCKMAN, 2001)</b>	Retração total	Umidade relativa do ambiente de ensaio – $h$
		Resistência à compressão média aos 28 dias – $f_{cm}$
		Tipo de cimento – $K$
		Forma e dimensões da amostra – $V/S$
<b>ACI 209R - 92</b>	Retração total	Forma e dimensões da amostra – $V/S$ e $\alpha$
		Tempo de cura – $\gamma_{sh,tc}$
		Umidade relativa do ambiente de ensaio – $\gamma_{sh,RH}$
		Forma da amostra – $\gamma_{sh,vs}$
		Quantidade de cimento – $\gamma_{sh,c}$
		Teor de ar incorporado – $\gamma_{sh,\alpha}$
		Quantidade de agregado miúdo – $\gamma_{sh,\psi}$
Abatimento de tronco de cone – $\gamma_{sh,s}$		

Portanto, por serem propriedades de extrema importância devido a suas relações diretas com a fissuração do concreto, mais estudos devem ser desenvolvidos para compreender melhor o desenvolvimento da retração autógena e por secagem dos concretos reciclados. Os resultados obtidos na literatura se mostram muitas vezes contraditórios. A possibilidade da ocorrência de cura interna originada pela elevada porosidade dos agregados reciclados pode ser um importante fenômeno para a redução da retração autógena nas primeiras idades do concreto. Em compensação, essa grande porosidade pode ocasionar maiores deformações por secagem. Assim, ainda não há um consenso dos efeitos da utilização de agregados reciclados na retração total do concreto. Além disso, os modelos existentes na literatura para a previsão dessas propriedades não foram desenvolvidos para concretos com agregados reciclados, e, portanto, não consideram os efeitos da possível cura interna promovida por esses materiais. Visando preencher essas lacunas de conhecimento, foram produzidos concretos reciclados de resistência normal e alta resistência para avaliação experimental da evolução das deformações por retração autógena e por retração por secagem. Como já realizado nos capítulos anteriores dessa tese, relações entre essas propriedades e algumas propriedades dos agregados reciclados também serão propostas. Por fim, também será apresentada uma comparação entre os

resultados obtidos experimentalmente e os valores previstos pelos modelos citados durante a revisão da literatura, de forma a avaliar a precisão e a possibilidade da aplicação desses modelos para o caso de concretos reciclados.

## **6.2. *Materiais e métodos***

Nessa seção é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo sobre retração autógena e retração por secagem de concretos naturais e reciclados. Dessa forma, são apresentados os materiais utilizados e a composição das misturas já foram apresentadas em capítulos anteriores, mas, para facilitar o entendimento do capítulo, são referenciados novamente. Por fim, são descritos os procedimentos empregados para a determinação da retração autógena e por secagem desses concretos.

### **6.2.1. *Caracterização dos materiais***

A caracterização dos materiais utilizados nessa parte do estudo foi apresentada no Capítulo 2 e no Capítulo 3. Foram utilizados os mesmos materiais usados na composição dos concretos do Capítulo 3, ou seja, Nat\_B1, RCA\_L\_B1, RCA\_D\_B1, Nat\_B0, RCA\_L\_B0, RCA\_D\_B0, areia natural, cimento CPV-ARI, superplastificante e água.

### **6.2.2. *Dosagem e composição das misturas***

A dosagem das misturas realizadas nesse capítulo foram as mesmas apresentadas na Tabela 3.7, na seção 3.2.2. Conforme já apresentado anteriormente, foi utilizado um método de dosagem científica (Modelo de Empacotamento Compressível) e adotado um método de compensação de água de absorção dos agregados reciclados equivalente a 50% da absorção total durante o processo de mistura. Dessa forma, evita-se que os agregados reciclados absorvam a água da mistura necessária para as reações de hidratação.

### **6.2.3. *Métodos de ensaio***

As metodologias empregadas para a avaliação experimental das propriedades de retração autógena e retração por secagem dos concretos naturais e reciclados desse estudo são apresentadas nos itens a seguir.

### 6.2.3.1. *Retração autógena*

O ensaio de retração autógena foi realizado em corpos de prova prismáticos de dimensões 75 x 75 x 285 mm (Figura 6.1-a). A temperatura e a umidade relativa do laboratório foram controladas e mantidas em  $23,0 \pm 2,0$  °C e  $50 \pm 4$  %, respectivamente.

A preparação dos moldes envolveu a colocação de placas de teflon no fundo e nas laterais, de forma a não restringir as deformações volumétricas, e o posicionamento dos pinos metálicos nas extremidades dos moldes com o auxílio de porcas e arruelas, para que fossem realizadas as medições das variações longitudinais dos corpos de prova. A distância interna entre os pinos foi medida antes da moldagem para ser considerada como a leitura de referência no cálculo da retração. A moldagem foi realizada em duas camadas (Figura 6.1-b) com o posicionamento de termopares no centro da amostra para o acompanhamento das variações de temperatura ao longo das reações de hidratação. Ao final do preenchimento dos moldes, foi colocada uma placa de teflon na parte superior da amostra e as amostras foram envolvidas por cinco camadas de filme plástico, tanto na direção transversal quanto na longitudinal, de forma a evitar a perda de água para o meio externo.

O posicionamento dos transdutores elétricos (LVDTs) para a medição dos deslocamentos longitudinais foi realizado no início da elevação da temperatura das amostras, que indicavam o início da pega do cimento. Neste momento, os parafusos de fixação dos moldes foram retirados, assim como as porcas utilizadas para prender os pinos metálicos, para garantir que estas peças não impediriam qualquer movimentação do corpo de prova.

A desmoldagem foi realizada após sete dias do início do ensaio e, logo em seguida, as amostras foram seladas com filme plástico nas duas direções e uma camada de fita de alumínio. Após a selagem, os corpos de prova foram mantidos em uma bancada e as suas medições foram feitas em relógio comparador digital em um pórtico na vertical (Figura 6.1-c). As medições dos comprimentos dos corpos de prova foram realizadas com maior frequência até a idade de 30 dias e após isto, foram feitas leituras mensais até as amostras completarem 365 dias de ensaio.

A variação da massa das amostras foi realizada durante todo o estudo através da sua medição diária em balança digital com precisão de 0,1 g (Figura 6.1-d). Estas medições tinham a finalidade de verificar a eficácia da selagem realizada, de forma a garantir que

não houve, simultaneamente, retração por secagem. A deformação por retração autógena é dada pela Equação (6.33):

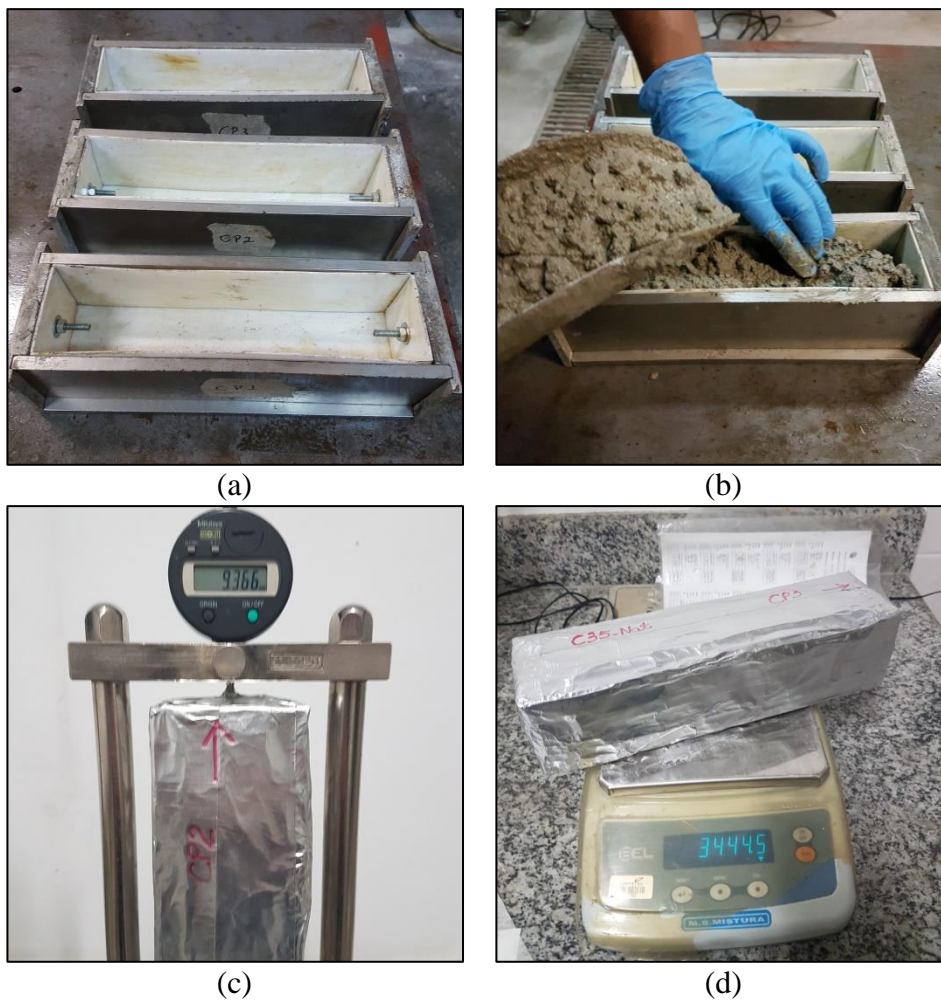
$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} \cdot 10^{-6} \quad (6.33)$$

Onde:

$\varepsilon_a$  é a retração autógena dos concretos;

$\Delta L$  é a variação dimensional para cada intervalo de tempo;

$L$  é a distância entre os pinos no interior do molde.



**Figura 6.1 – Procedimentos para ensaio de retração autógena em concretos: (a) moldes prismáticos; (b) colocação do concreto nos moldes em duas camadas; (c) leitura vertical em relógio comparador e (d) pesagem da amostra para verificação da constância de massa**

#### 6.2.3.2. Retração por secagem

O ensaio de retração por secagem foi realizado em corpos de prova prismáticos semelhantes aos utilizados para ensaios de retração autógena, com dimensões de 75 x 75

x 285 mm (Figura 6.2). O posicionamento dos pinos metálicos para a leitura das deformações foi feito durante a preparação dos moldes.

A moldagem foi realizada com a colocação do concreto em duas camadas nos moldes. Após o término da moldagem, as amostras foram mantidas em cura úmida, com o auxílio de uma manta úmida por 24 horas, de forma a impedir a perda de água para o ambiente.

A desmoldagem foi realizada após 24 horas e as amostras foram mantidas em câmara úmida até a idade do início do ensaio. Aos 28 dias, as amostras foram retiradas da cura úmida e a leitura inicial do comprimento foi realizada em relógio comparador digital em um pórtico na vertical e a medida da massa foi feita em balança digital com precisão de 0,1 g. A partir deste momento, as amostras foram mantidas em ambiente com temperatura e umidade constantes e iguais a  $23,0 \pm 2,0$  °C e  $50 \pm 4$  %, respectivamente.

A medida da retração por secagem é dada de forma similar a apresentada para a retração autógena, na Equação (6.33). A perda de massa foi calculada pela relação entre as diferenças de massas e a massa inicial da amostra (Equação (6.34)).

$$\Delta \text{ Massa} = \frac{m_f - m_i}{m_i} \quad (6.34)$$

Onde:

$\Delta$  Massa é a perda de massa dos concretos;

$m_f$  é a massa da amostra ao final do ensaio;

$m_i$  é a massa da amostra após 28 dias de cura úmida.



Figura 6.2 – Amostras para ensaio de retração por secagem após a cura de 28 dias

### **6.3. Apresentação e análise dos resultados**

Nessa seção, são apresentados os resultados experimentais obtidos para retração autógena e retração por secagem para todos os concretos desse estudo, assim como relações existentes entre essas propriedades e as propriedades dos agregados reciclados utilizados. Por fim, é mostrada a comparação entre os valores obtidos experimentalmente e a previsão da retração final por modelos existentes na literatura.

#### **6.3.1. Retração autógena**

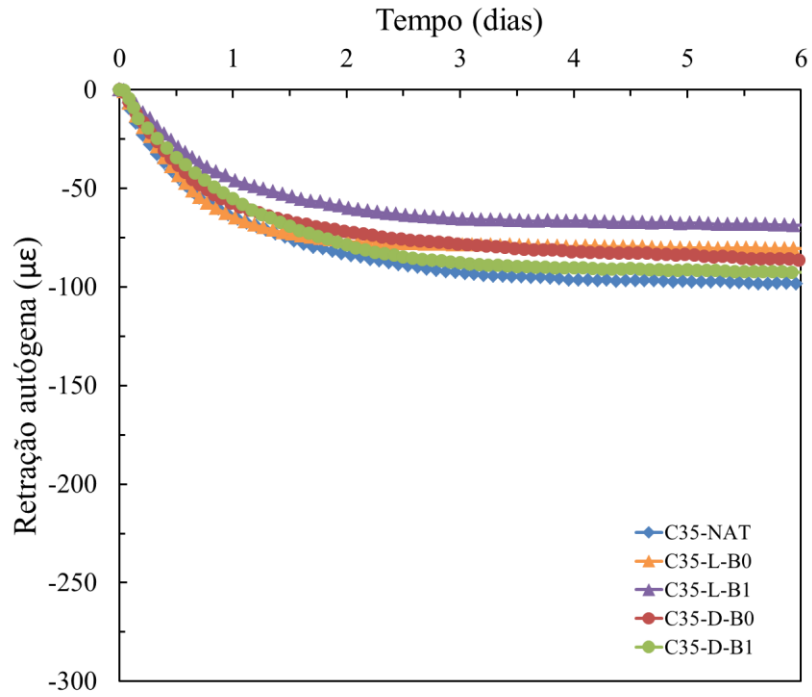
A Figura 6.3 apresenta as curvas médias de retração autógena nos primeiros seis dias de idade para os concretos da classe de resistência normal (C35) e de alta resistência (C60).

Nota-se que durante esse período, o desenvolvimento da retração autógena foi mais intenso nos primeiros três dias. De fato, a utilização de um cimento de alta resistência inicial promove uma aceleração nas reações de hidratação, provocando deformações mais acentuadas nas primeiras idades. Além disso, conforme o esperado, os concretos da classe de alta resistência apresentaram maiores valores de retração autógena no período inicial do ensaio. Conforme visto na revisão da literatura, quanto maior o consumo de cimento, maiores são os valores de retração autógena em concretos e maiores são os riscos de fissuração da estrutura, principalmente nas primeiras idades.

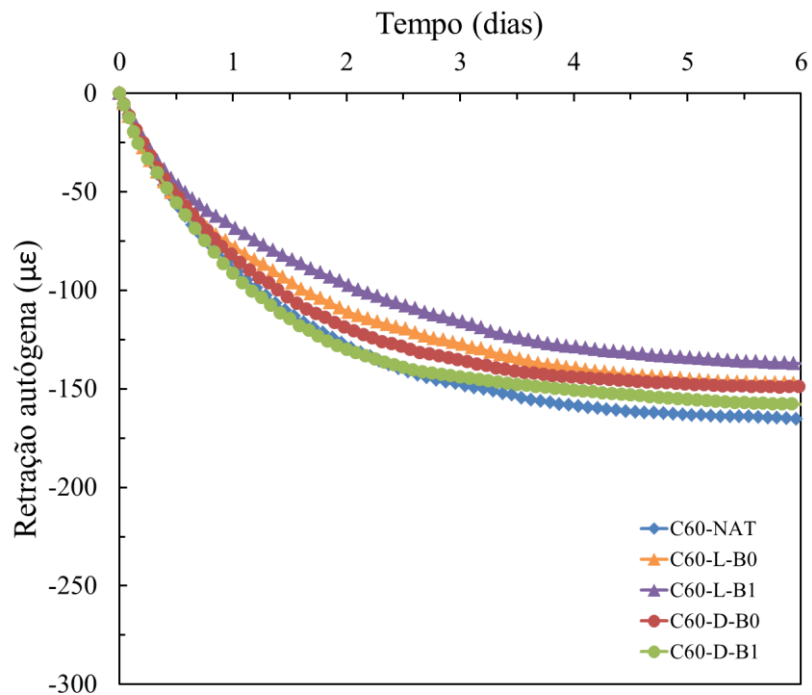
Tanto na classe de resistência normal quanto na classe de alta resistência, os concretos com agregados naturais apresentaram os maiores valores de retração autógena em cada classe, nas primeiras idades. Esse fato confirma o que alguns autores já haviam sugerido: a grande quantidade de poros presentes nos agregados reciclados funciona como pequenos reservatórios de água, liberando gradativamente essa água armazenada para as reações de hidratação do cimento. Essa é a chamada cura interna do concreto. Além disso, os concretos produzidos com o agregado graúdo RCA\_L\_B1 (agregado com a maior quantidade de argamassa aderida e absorção de água) foram os que apresentaram os menores valores de retração autógena dentro de cada classe, no início do ensaio. Esse é mais um indício que esses agregados contribuem para a cura interna do concreto.

Nesses seis primeiros dias, as leituras foram realizadas com o auxílio de LVDTs, por isso percebe-se uma grande densidade de pontos nessas curvas. Após esse período, os

deslocamentos passaram a ser lidos manualmente em relógio comparador até aproximadamente 1 ano de ensaio.



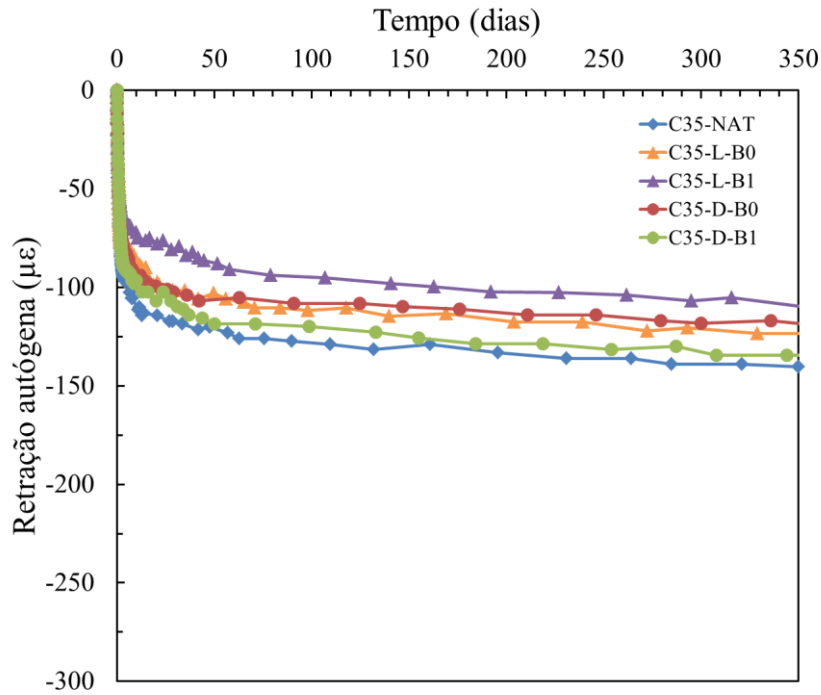
(a)



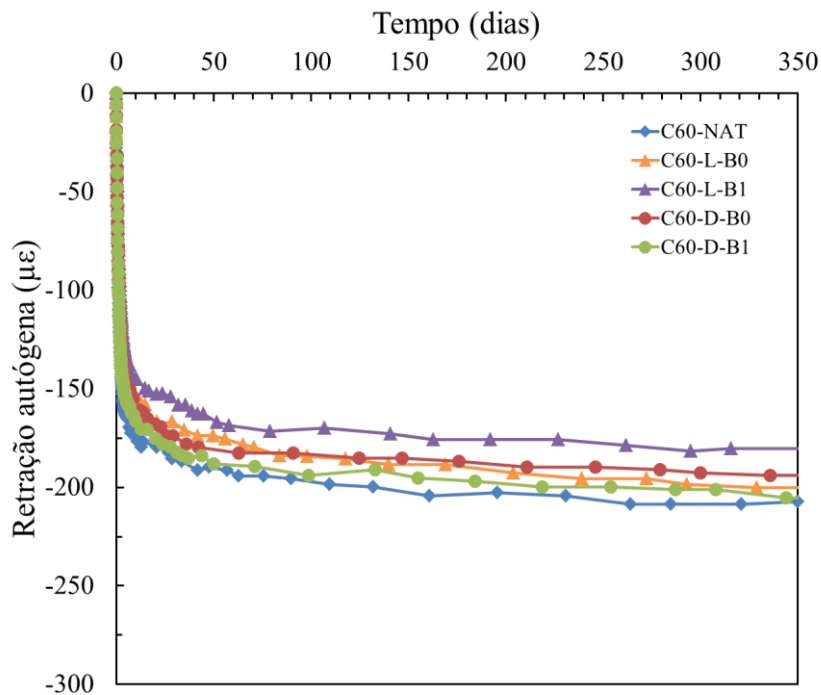
(b)

**Figura 6.3 – Curvas médias de retração autóloga nos primeiros seis dias de idade dos concretos das classes: (a) C35 e (b) C60**

As curvas médias de retração autógena até o final do ensaio, das duas classes de resistência são apresentadas na Figura 6.4.



(a)



(b)

Figura 6.4 – Curvas médias de retração autógena após 350 dias de ensaio para os concretos das classes: (a) C35 e (b) C60

É possível observar que até aproximadamente 30 dias de ensaio, os concretos das duas classes de resistência ainda apresentavam um aumento significativo nos valores de



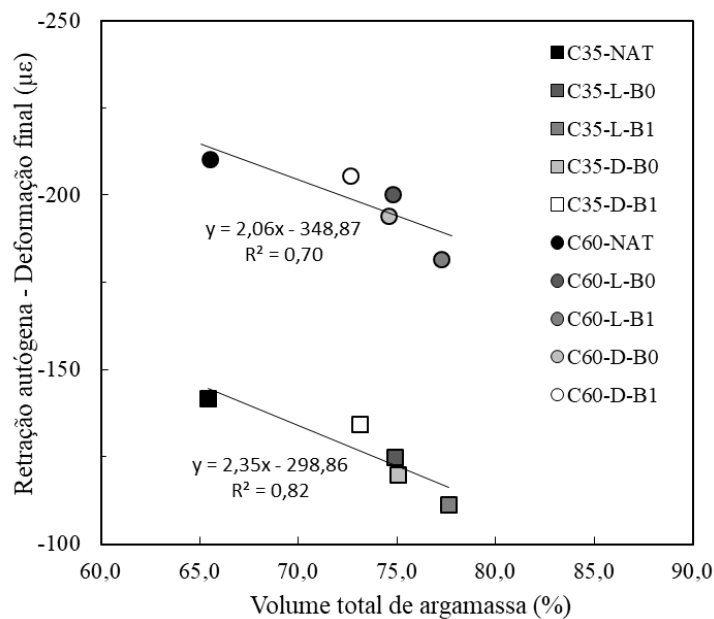
retração autógena. Após esse período, as deformações foram cada vez menores até se tornarem praticamente estáveis. Durante todo o ensaio, a variação de massa das amostras foi acompanhada, de forma a evitar que efeitos de secagem fossem erroneamente considerados durante este ensaio. Assim, nenhuma das amostras apresentou perda de massa superior a 0,05% da massa inicial, mostrando que as deformações medidas foram provenientes somente das reações de hidratação do cimento.

Os valores de deformações por retração autógena após 6 dias e até o final do ensaio são apresentados na Tabela 6.10. Nota-se que ao final do ensaio, a mistura C35-L-B1 apresentou - 111  $\mu\epsilon$  de deformação, enquanto o concreto contendo somente agregados naturais dessa classe apresentou uma retração de -142  $\mu\epsilon$ . Resultados semelhantes foram obtidos para a classe de alta resistência, onde o concreto C60-L-B1 teve uma deformação de -182  $\mu\epsilon$  e o concreto C60-NAT teve -210  $\mu\epsilon$  de retração autógena.

**Tabela 6.10 – Resultados obtidos através do ensaio de retração autógena para os concretos das duas classes de resistência**

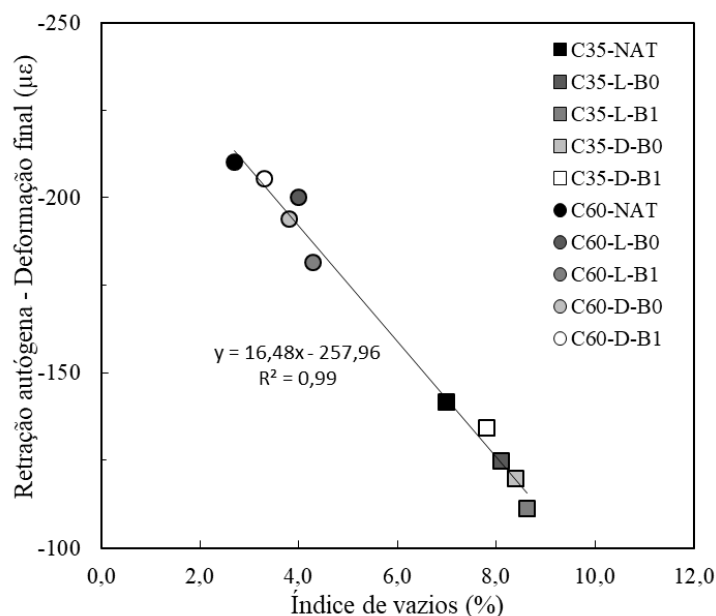
Misturas	Retração autógena ( $\mu\epsilon$ )	
	Após 6 dias	Após 350 dias
<b>C35-NAT</b>	-98 ( $\pm$ 5,6%)	-142 ( $\pm$ 6,7%)
<b>C35-L-B0</b>	-80 ( $\pm$ 5,8%)	-125 ( $\pm$ 3,8%)
<b>C35-L-B1</b>	-69 ( $\pm$ 4,3%)	-111 ( $\pm$ 3,2%)
<b>C35-D-B0</b>	-86 ( $\pm$ 6,5%)	-120 ( $\pm$ 3,6%)
<b>C35-D-B1</b>	-92 ( $\pm$ 3,5%)	-134 ( $\pm$ 2,1%)
<b>C60-NAT</b>	-165 ( $\pm$ 1,9%)	-210 ( $\pm$ 1,7%)
<b>C60-L-B0</b>	-147 ( $\pm$ 2,2%)	-200 ( $\pm$ 1,6%)
<b>C60-L-B1</b>	-137 ( $\pm$ 2,4%)	-182 ( $\pm$ 1,1%)
<b>C60-D-B0</b>	-149 ( $\pm$ 2,7%)	-194 ( $\pm$ 3,0%)
<b>C60-D-B1</b>	-158 ( $\pm$ 2,0%)	-205 ( $\pm$ 4,2%)

Comparando-se os valores de retração autógena ao final do ensaio com o volume total de argamassa de cada concreto (Figura 6.5), nota-se que, assim como apresentado em capítulos anteriores, o teor de argamassa aderida ao agregado reciclado contribui com um aumento do volume total de argamassa da mistura, sendo esse um parâmetro-chave relacionado com diferentes propriedades do concreto.



**Figura 6.5 – Relação entre a retração autógena ao final do ensaio e o volume total de argamassa para todos os concretos desse estudo**

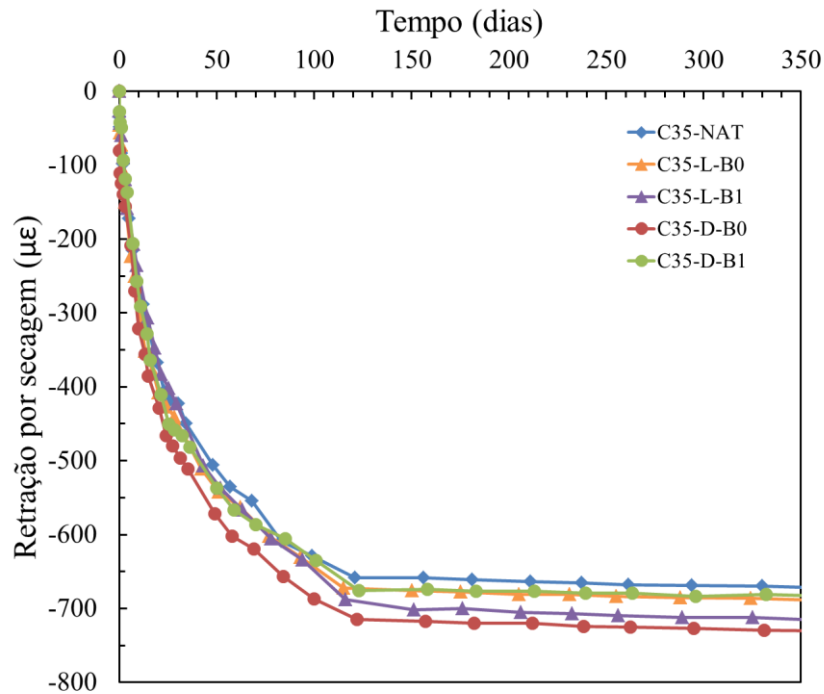
Dessa forma, torna-se evidente que a utilização de agregados reciclados mais porosos contribuiu para o desenvolvimento da cura interna do concreto, reduzindo significativamente a sua retração por reações de hidratação do cimento. Este fato pode ser confirmado analisando-se a relação entre os valores obtidos para retração autógena e o índice de vazios dos concretos, mostrada na Figura 6.6.



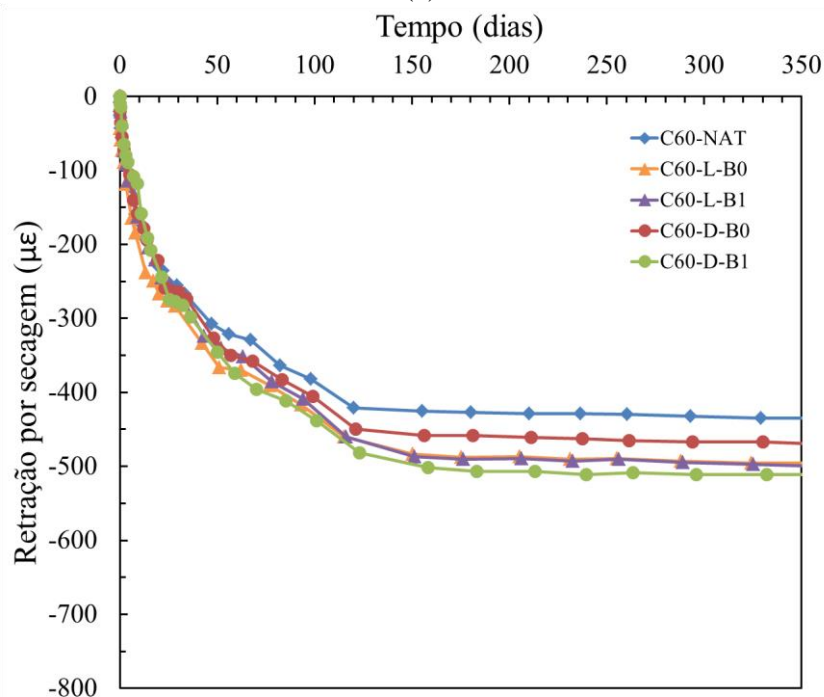
**Figura 6.6 – Relação entre a retração autógena ao final do ensaio e o índice de vazios para todos os concretos desse estudo**

### 6.3.2. Retração por secagem

As curvas médias obtidas através do ensaio de retração por secagem para os concretos de resistência normal e alta resistência são apresentadas na Figura 6.7.



(a)



(b)

Figura 6.7 – Curvas médias de retração por secagem após 350 dias de ensaio para os concretos das classes: (a) C35 e (b) C60

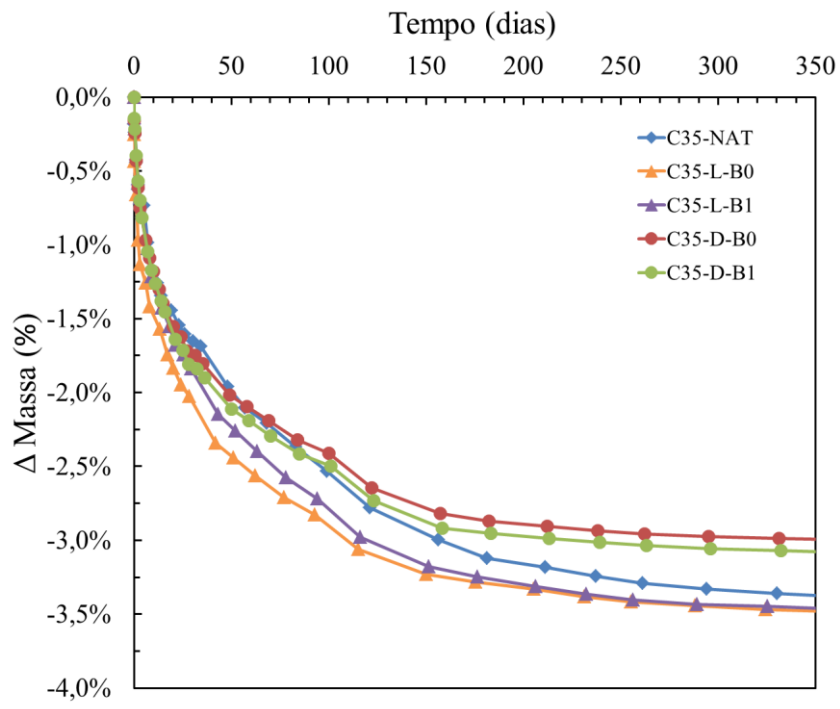
Através da análise dessas curvas, é possível observar que os concretos de resistência normal (classe C35) apresentaram maiores valores de retração por secagem, em relação aos concretos de alta resistência (classe C60). Conforme visto no Capítulo 3, por apresentarem maiores valores de água/cimento, esses concretos apresentam uma maior quantidade de vazios em seu interior. Dessa forma, à medida que a água contida em seus poros evapora, esses concretos tendem a sofrer maiores deformações.

Durante os primeiros 120 dias de ensaio, a retração por secagem de todos os concretos ainda apresentava grande variação. A partir desse momento, as deformações se tornaram mais estáveis e as leituras passaram a ser mais espaçadas. Esse comportamento tem relação direta com a perda de massa dos concretos, visto que a variação de massa ocorre devido à evaporação da água contida em seu interior. As curvas de perda de massa das misturas de resistência normal e de alta resistência são apresentadas na Figura 6.8.

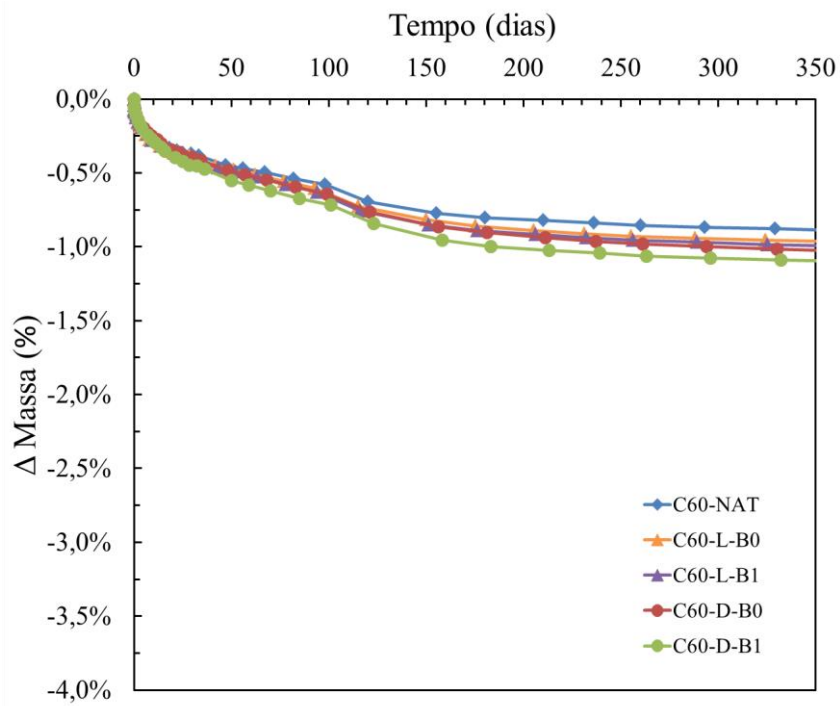
Na classe C35, o concreto C35-NAT apresentou o menor valor de retração por secagem ao final do ensaio, enquanto os concretos C35-L-B1 e C35-D-B0 apresentaram valores de retração superiores a  $-700 \mu\epsilon$ . Na classe C60, foi observado um comportamento semelhante, visto que o concreto C60-NAT foi o que apresentou menor retração por secagem dentre as cinco misturas. Os valores de retração por secagem e perda de massa ao final do ensaio são apresentados na Tabela 6.11.

Ao contrário do que foi observado nos ensaios de retração autógena, os concretos reciclados apresentaram maiores valores de retração por secagem do que os concretos contendo somente agregados naturais. Conforme visto na revisão da literatura, ainda não há um consenso de como a cura interna pode influenciar nas deformações do concreto por evaporação de água. Nesse estudo, o efeito da cura interna não parece ter contribuído para uma redução na retração por secagem dos concretos reciclados a ponto desses concretos retraírem menos do que os concretos naturais.

Nos estudos da literatura, o efeito da cura interna foi avaliado considerando diferentes teores de umidade para o agregado reciclado, ou seja, saturado superfície seca, parcialmente saturado e seco. Dessa forma, os autores conseguiram avaliar melhor em que condição de umidade os agregados reciclados melhor contribuíam para esse efeito.



(a)



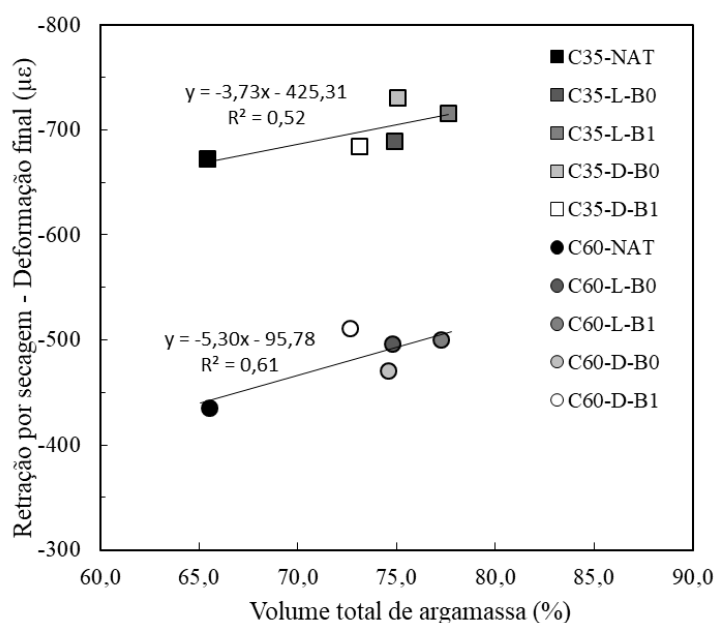
(b)

Figura 6.8 – Perda de massa durante o ensaio de retração por secagem dos concretos das classes: (a) C35 e (b) C60

**Tabela 6.11 – Retração por secagem e perda de massa ao final do ensaio para todos os concretos desse estudo**

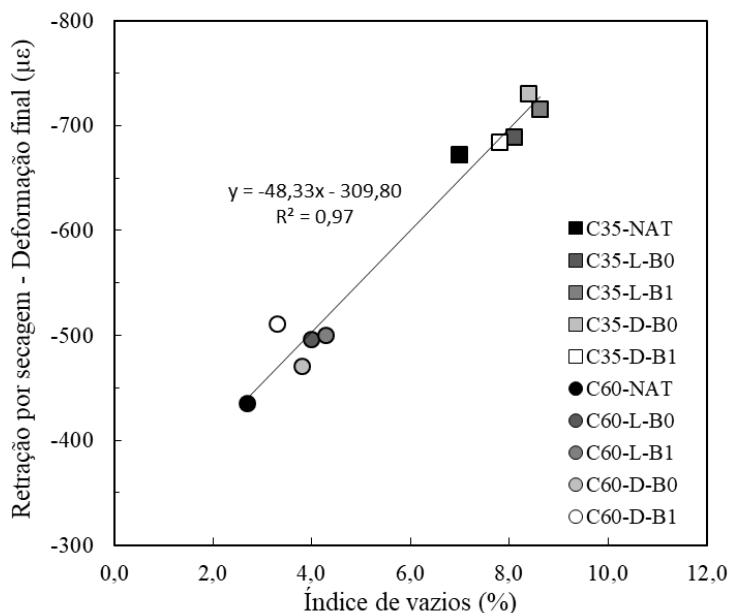
Misturas	Retração por secagem final (µε)	Perda de massa (%)
C35-NAT	- 673 (± 3,0%)	- 3,4 (± 1,4%)
C35-L-B0	- 689 (± 5,7%)	- 3,5 (± 2,1%)
C35-L-B1	- 716 (± 1,7%)	- 3,5 (± 1,8%)
C35-D-B0	- 731 (± 2,5%)	- 3,0 (± 0,3%)
C35-D-B1	- 684 (± 3,7%)	- 3,1 (± 6,3%)
C60-NAT	- 435 (± 0,8%)	- 0,9 (± 1,5%)
C60-L-B0	- 496 (± 2,9%)	- 1,0 (± 2,5%)
C60-L-B1	- 500 (± 3,1%)	- 1,0 (± 1,1%)
C60-D-B0	- 470 (± 4,5%)	- 1,0 (± 1,6%)
C60-D-B1	- 511 (± 3,5%)	- 1,1 (± 3,0%)

Em relação ao volume total de argamassa existente em cada um dos concretos, a Figura 6.9 mostra que esse parâmetro não apresentou uma boa correlação com os valores de retração por secagem ao final do ensaio.



**Figura 6.9 – Relação entre a retração por secagem ao final do ensaio e o volume total de argamassa para todos os concretos desse estudo**

Porém, em relação ao índice de vazios mostrado na Figura 6.10, é possível perceber que a retração por secagem está muito mais relacionada ao índice de vazios presentes no concreto. Essa é uma medida direta da quantidade de poros acessíveis à água e, portanto, apresenta uma relação direta com as deformações que ocorrem por evaporação de água desses poros.

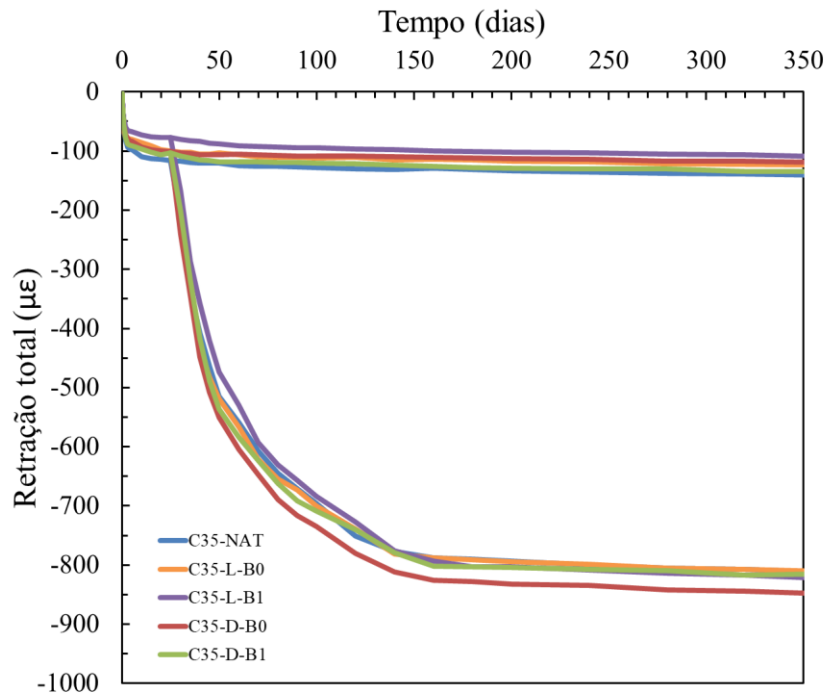


**Figura 6.10 – Relação entre a retração por secagem ao final do ensaio e o índice de vazios para os concretos desse estudo**

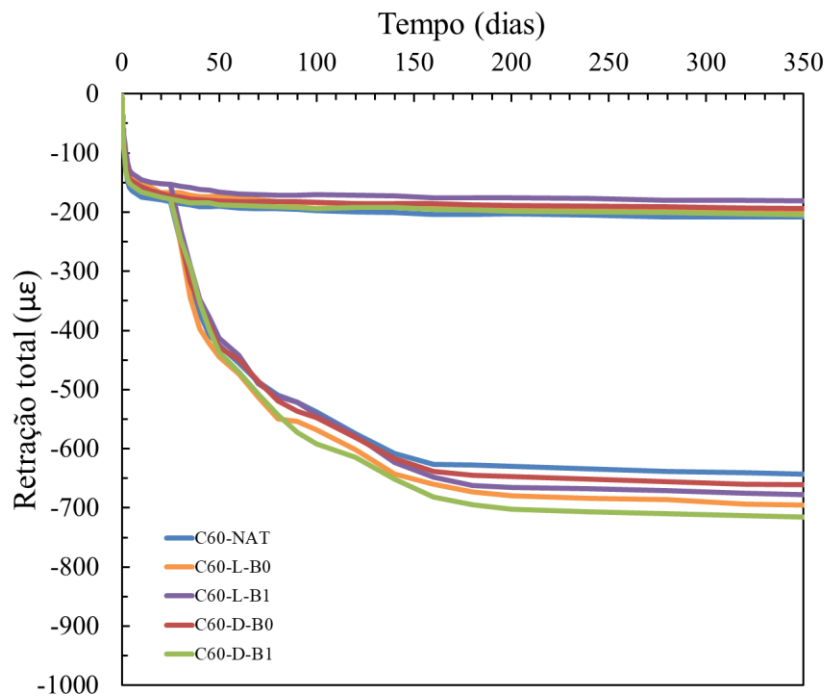
### 6.3.3. Retração total

Portanto, com base nos resultados de retração autógena e retração por secagem dos concretos desse estudo, é possível obter sua retração total, através da soma das parcelas relativas a cada uma das retrações. As curvas de retração total são mostradas na Figura 6.11.

Até os 28 dias de idade, somente a parcela relativa à retração autógena foi considerada, visto que o ensaio de retração por secagem só teve início após 28 dias de cura. Nesse momento, as duas retrações passam a ser consideradas, de forma que no eixo horizontal, o tempo é contado pela idade do concreto e não mais pelo tempo de ensaio. Assim, o tempo mostrado no eixo horizontal é o mesmo tempo considerado para retração autógena, enquanto para a retração por secagem é dado pela soma do tempo de ensaio e do tempo de cura (28 dias).



(a)



(b)

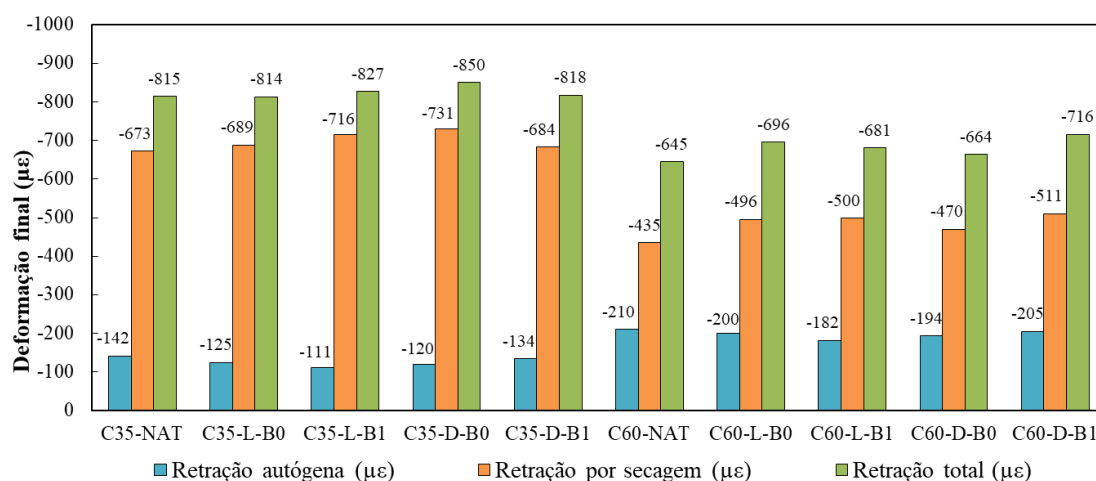
**Figura 6.11 – Retração total dos concretos após 350 dias de ensaio: (a) classe C35 e (b) classe C60**

Através da análise dessas curvas e da representação gráfica dos valores finais de retração autógena, retração por secagem e retração total mostradas na Figura 6.12, é possível observar que a cura interna promovida pelos agregados foi capaz de reduzir os



valores de retração total dos concretos reciclados, porém somente na classe de resistência normal, esses valores foram relativamente próximos ao do concreto natural. Nota-se que os concretos C35-L-B0 e C35-D-B1 apresentaram retração total de  $-814 \mu\epsilon$  e  $-818 \mu\epsilon$ , respectivamente. Esses valores são bem similares ao obtido para o concreto natural C35-NAT ( $-815 \mu\epsilon$ ), mostrando que a utilização desses agregados reciclados não prejudicou o comportamento desses concretos.

Já para a classe de alta resistência, todos os concretos reciclados apresentaram maiores valores de retração total que o concreto de referência. Isso mostra que, apesar da cura interna ter promovido uma redução nos valores de retração autógena dos concretos reciclados, essa redução não foi suficiente para compensar o aumento nos valores de retração por secagem provocados pela utilização desses agregados.



**Figura 6.12 – Comparativo entre os valores máximos de retração autógena, retração por secagem e retração total dos concretos**

Portanto, conforme visto na revisão de literatura, ainda não há um consenso sobre os efeitos dos agregados reciclados na retração total dos concretos. Esse estudo mostrou que esses agregados não provocaram reduções consideráveis nessa propriedade, de forma que ela fosse menor do que em concretos naturais. Porém, na classe de resistência normal foi observado que os valores de retração total para os concretos reciclados foram bem semelhantes ao valor obtido para o concreto de referência. Assim, a utilização de agregados reciclados não parece contribuir significativamente para a fissuração de longa duração provocada por deformações de retração autógena e por secagem dos concretos.

#### **6.3.4. Modelos de previsão de retração em concretos**

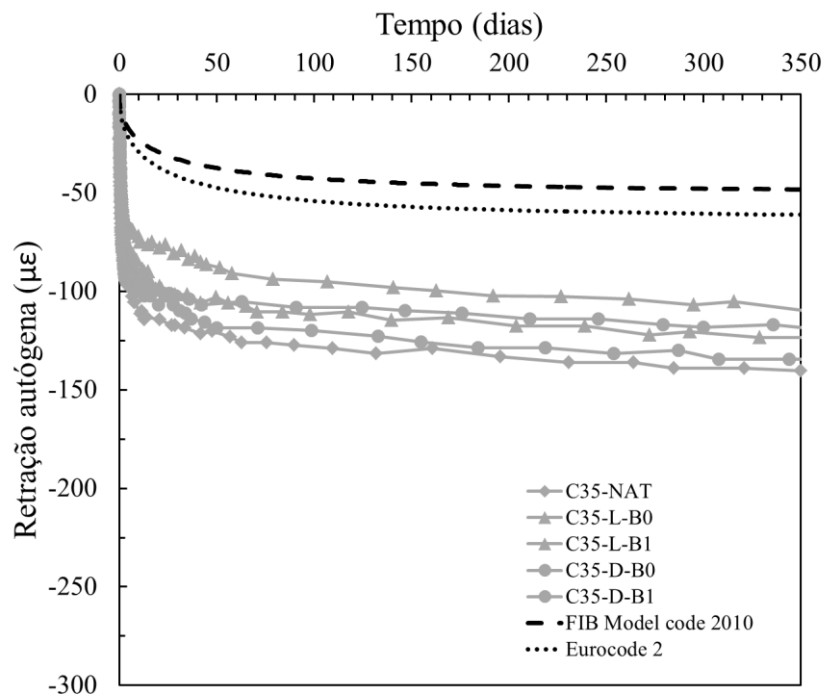
A Figura 6.13 apresenta a comparação entre as curvas experimentais obtidas no ensaio de retração autógena e as curvas previstas pelo FIB MODEL CODE (2010) e pelo EUROCODE (2004). Como as propriedades consideradas para o cálculo da previsão desses modelos é muito semelhante entre as misturas de cada classe, foi calculada uma curva representativa com os valores médios de cada propriedade para cada classe de resistência. Assim, a Figura 6.13-a mostra as previsões para retração autógena para a classe C35 e a Figura 6.13-b apresenta essas curvas para a classe C60.

Nota-se que para ambas as classes de resistência, os modelos apresentados subestimaram as deformações por retração autógena. Isso mostra que apesar da cura interna promovida pelos agregados reciclados ter sido um fator que foi capaz de reduzir os valores de retração autógena dos concretos, os modelos de previsão apresentados na revisão de literatura não foram apropriados para estimar com precisão esse comportamento.

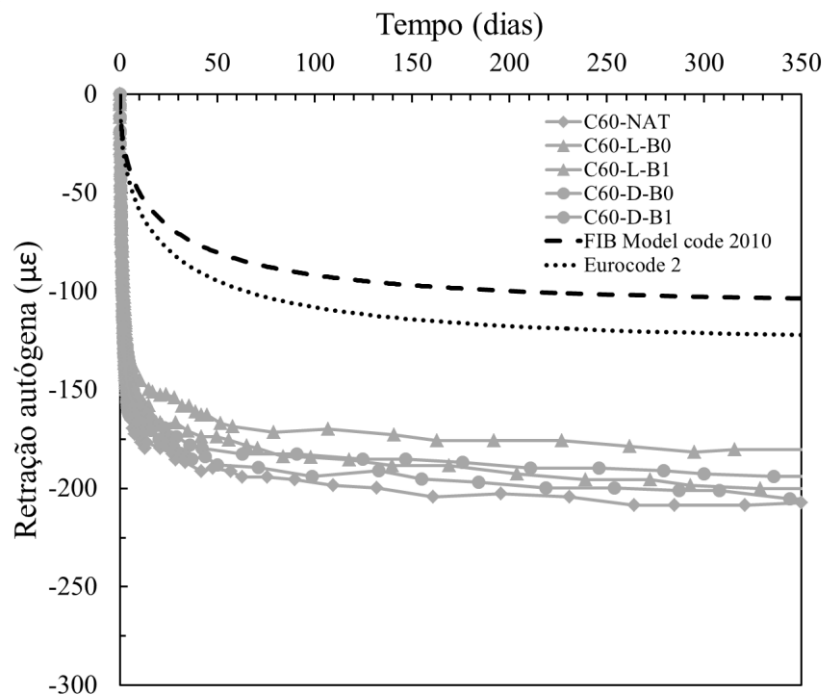
Em relação à retração por secagem, as curvas experimentais e as curvas previstas pelos mesmos modelos apresentados para a retração autógena são mostrados na Figura 6.14. Através da análise das curvas, foi possível observar que o modelo FIB MODEL CODE (2010) conseguiu estimar com bastante precisão o comportamento dos concretos de resistência normal (C35), inclusive para os concretos reciclados. Já para a classe de alta resistência (C60), o FIB MODEL CODE (2010) apresentou uma estimativa ligeiramente maior que as deformações obtidas experimentalmente, mas ainda assim, pode ser considerado adequado para a previsão da retração por secagem dos concretos desse estudo.

Porém, assim como ocorrido para a retração autógena, o EUROCODE (2004) subestimou os valores de retração por secagem para as duas classes de cimento. Isso pode ter ocorrido porque o modelo foi calibrado com a aplicação de um cimento diferente do utilizado nesse estudo.

Assim, considerando-se a retração autógena separadamente da retração por secagem, conclui-se que o FIB MODEL CODE (2010) foi capaz de estimar a retração por secagem dos concretos desse estudo com mais precisão. Para a retração autógena, nenhum dos modelos citados pode ser considerado eficiente na previsão dessa propriedade, independentemente da classe de resistência do concreto.

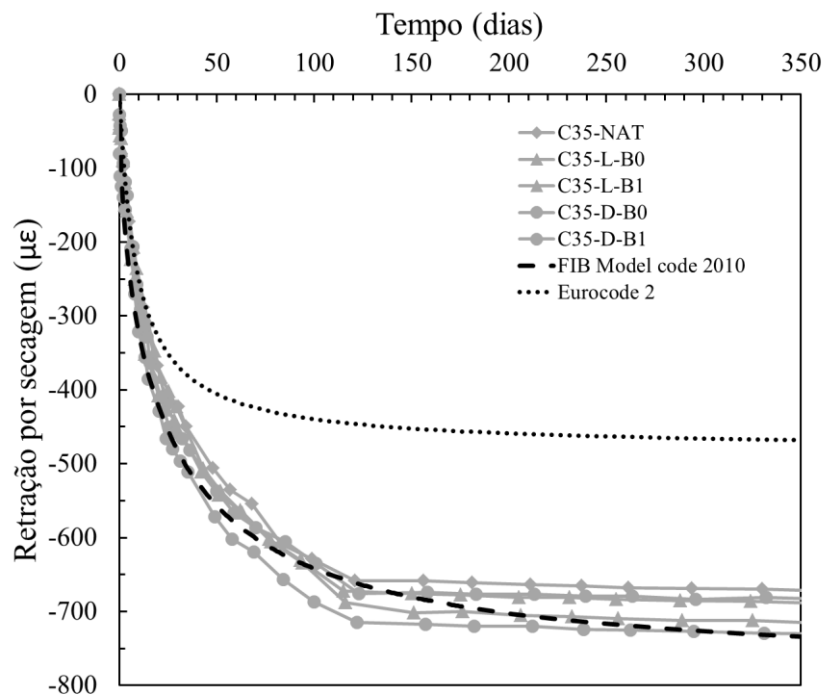


(a)

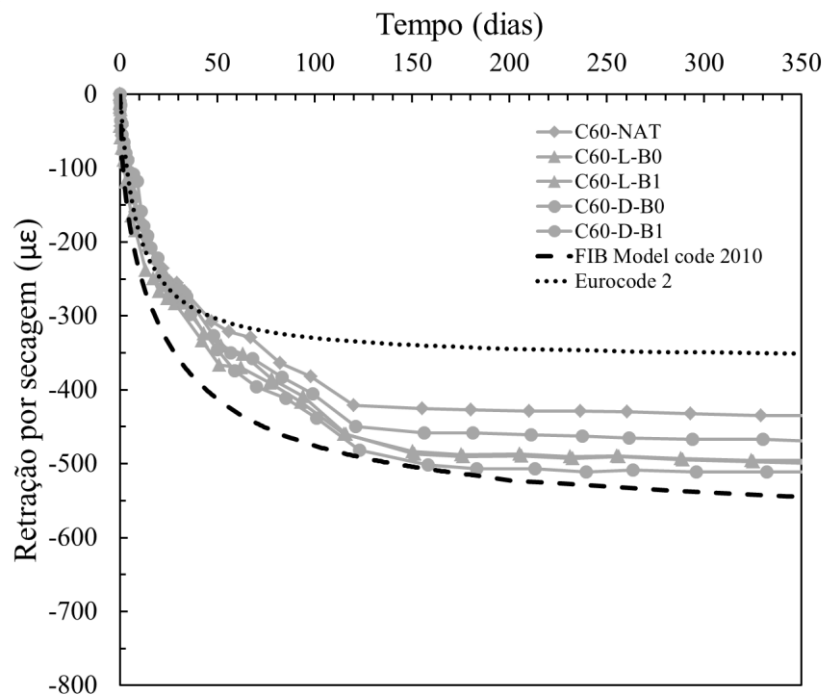


(b)

**Figura 6.13 – Curvas experimentais e curvas previstas pelos modelos FIB Model Code (2010) e Eurocode (2004) para retração autógena dos concretos: (a) Classe C35 e (b) Classe C60**



(a)



(b)

**Figura 6.14 – Curvas experimentais e curvas previstas pelos modelos FIB Model Code (2010) e Eurocode (2004) para retração por secagem dos concretos: (a) Classe C35 e (b) Classe C60**

Em relação à retração total dos concretos, foram apresentados quatro modelos durante a revisão de literatura desse estudo. São eles: BAZANT-BAWEJA B3 (1995), CEP-FIP 90 (1990), GL2000 (2001) e ACI 209R-08 (2008). As curvas experimentais e as curvas previstas pelos modelos citados para retração total dos concretos são apresentadas na Figura 6.15.

O modelo BAZANT-BAWEJA B3 (1995) estimou a retração total dos concretos de resistência normal com grande precisão. Para os concretos da classe C60, esse modelo apresentou valores inferiores ao obtido experimentalmente, durante todo o ensaio, não podendo ser considerado adequado para a previsão de retração em concretos de alto desempenho.

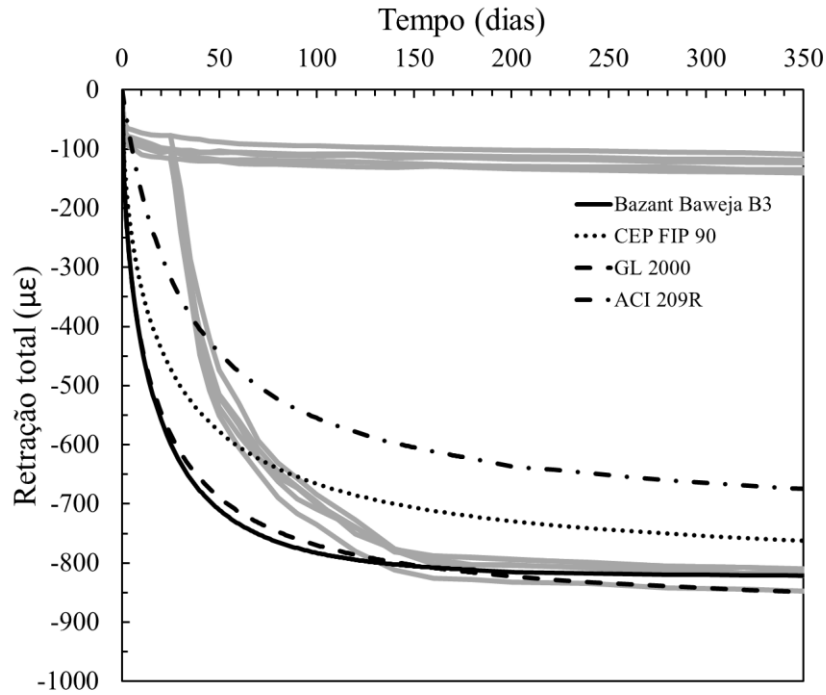
O modelo CEP-FIP 90 (1990) pode ser considerado o modelo mais impreciso para a previsão da retração total em concretos, tanto para os concretos de resistência normal, quanto para os de alta resistência. De fato, esse modelo possui poucos parâmetros de entrada, prejudicando a sua exatidão. Nesse caso, talvez fosse necessário considerar parâmetros adicionais, como o módulo de elasticidade do concreto e o tipo de cura utilizado antes do ensaio, para aumentar a precisão desse modelo.

Já o GL2000 (2001) foi considerado o modelo mais adequado para a previsão da retração total dos concretos desse estudo. Esse modelo consegue estimar valores muito próximos aos obtidos experimentalmente para as duas classes de resistência, mas principalmente para classe C35. Para os concretos de alta resistência, a curva do modelo se aproximou mais do comportamento apresentado pelo concreto natural (C60-NAT).

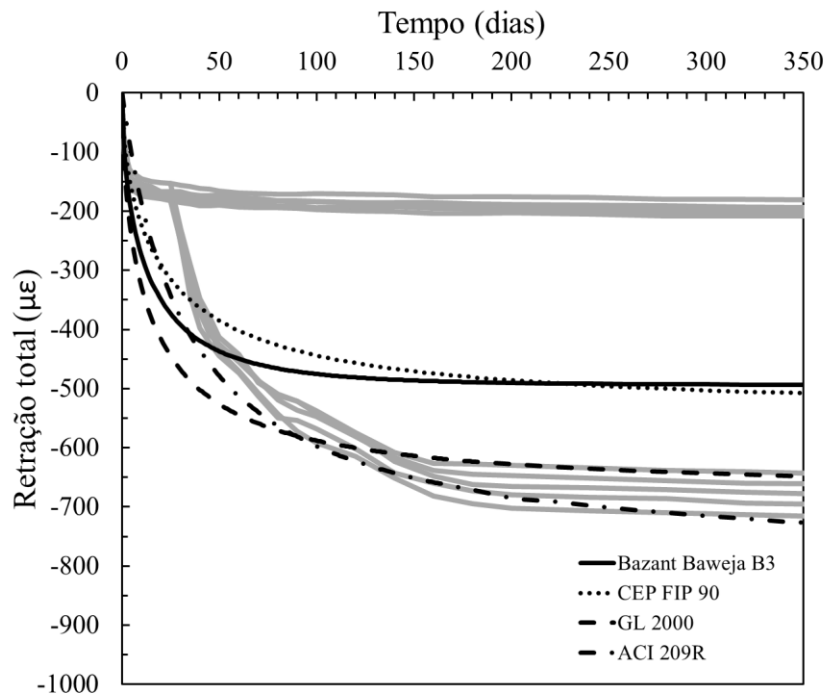
O modelo ACI 209R (2008) conseguiu estimar com mais precisão a retração total dos concretos de alta resistência desse estudo. Para os concretos de resistência normal, esse foi o modelo que mais subestimou os valores experimentais. Acredita-se que apesar desse modelo considerar diversos parâmetros de entrada, ele não considera parâmetros fundamentais para o desenvolvimento da retração, como o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos concretos.

De um modo geral, os modelos apresentados poderiam ser ajustados para melhorar sua precisão, de forma a considerar mais parâmetros de entrada, principalmente informações relacionadas aos agregados reciclados, como por exemplo, o módulo de elasticidade do agregado (ou de seu concreto de origem) e sua absorção de água. Essas propriedades tem grande influência nas deformações de longa duração dos concretos, principalmente

na retração por secagem, visto que ela representa a maior parcela da retração total dos concretos.



(a)

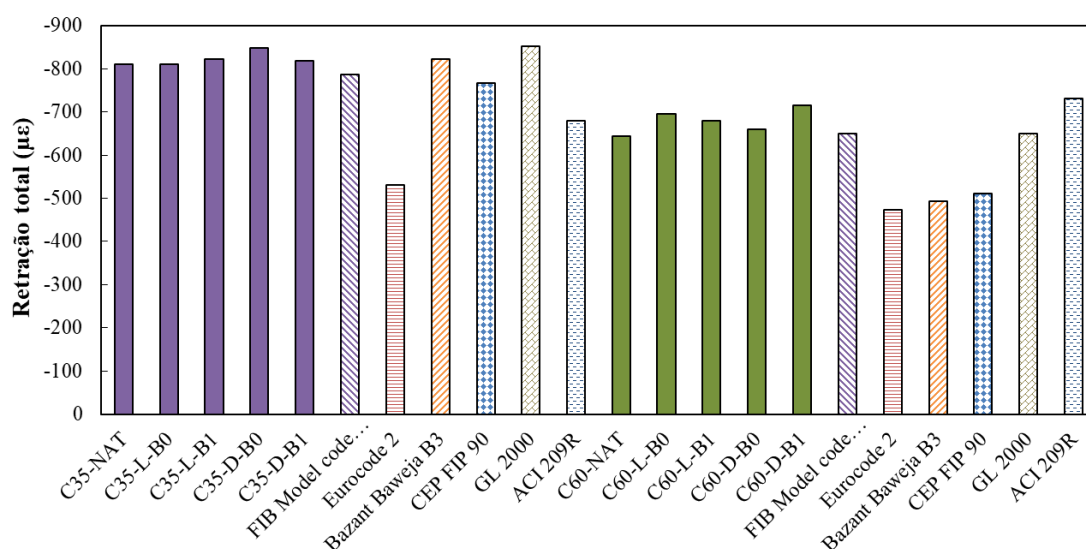


(b)

**Figura 6.15 – Curvas experimentais e curvas previstas pelos modelos BAZANT-BAWEJA B3 (1995), CEP-FIP 90 (1990), GL2000 (2001) e ACI 209R-08 (2008) para retração total dos concretos: (a) Classe C35 e (b) Classe C60**

Por fim, a Figura 6.16 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais ao final do ensaio (após 350 dias de idade) e os valores calculados previstos pelos modelos citados nesse capítulo. Para o FIB MODEL CODE (2010) e EUROCODE 2 (2004), foram somadas as parcelas relativas à retração autógena e à retração por secagem dos concreto, de forma semelhante a realizada para os resultados experimentais da retração total.

Nota-se que o FIB MODEL CODE (2010) foi capaz de estimar com muita precisão a retração total final para os concretos de resistência normal e de alta resistência. Portanto, o FIB MODEL CODE (2010) e o GL2000 (2001) foram os modelos considerados mais adequados para a previsão da retração total dos concretos desse estudo, independente de sua classe de resistência.



**Figura 6.16 – Comparativo entre os valores experimentais de retração total (autógena + secagem) ao final do ensaio e a previsão dos modelos disponíveis na literatura**

#### **6.4. Conclusões do capítulo**

Portanto, esse capítulo apresentou os resultados experimentais do estudo de retração autógena e retração por secagem em concretos reciclados e a comparação desses resultados com modelos de previsão disponíveis na literatura. As principais conclusões desse capítulo são listadas a seguir:

- Os resultados de retração autógena confirmaram que os agregados reciclados são capazes de promover a cura interna dos concretos reciclados, ou seja, a grande quantidade de poros presentes nesses agregados funciona como pequenos reservatórios de água, liberando gradativamente essa água armazenada para as reações de hidratação do cimento. Assim, os concretos produzidos com o agregado graúdo RCA\_L\_B1 (agregado com a maior quantidade de argamassa aderida e absorção de água) foram os que apresentaram os menores valores de retração autógena dentro de cada classe, durante todo o ensaio.
- O volume total de argamassa (ou seja, a soma de argamassa aderida aos agregados reciclados com a argamassa nova) se mostrou um parâmetro-chave no desenvolvimento da retração autógena de concretos. Assim como ele, o índice de vazios também apresentou grande correlação com os resultados obtidos experimentalmente. De fato, esses dois parâmetros estão relacionados à capacidade dos agregados reciclados de promoverem a cura interna do concreto.
- Diferentemente do ocorrido para retração autógena, no ensaio de retração por secagem os concretos reciclados apresentaram maiores valores de deformação do que os concretos contendo somente agregados naturais. Dessa forma, o efeito da cura interna não parece ter contribuído para uma redução na retração por secagem dos concretos reciclados a ponto desses concretos retraírem menos do que os concretos naturais.
- As deformações sofridas por evaporação de água tiveram uma boa correlação com o índice de vazios dos concretos, visto que essa é uma medida direta da quantidade de poros acessíveis à água.
- Os valores de retração total para os concretos reciclados de resistência normal foram bem próximos dos obtidos para o concreto natural. Assim, a utilização de agregados reciclados parece contribuir positivamente para o controle da fissuração de longa duração provocada por deformações de retração autógena e por secagem dos concretos.
- Em relação aos modelos de previsão para retração, observou-se que o FIB MODEL CODE (2010) foi capaz de estimar a retração por secagem dos concretos desse estudo com mais precisão. Para a retração autógena, nenhum dos dois modelos citados pode ser considerado eficiente na previsão dessa propriedade, independentemente da classe de resistência do concreto.



- Por fim, o FIB MODEL CODE (2010) e o GL2000 (2001) foram os modelos considerados mais adequados para a previsão da retração total dos concretos desse estudo, independente de sua classe de resistência. Para os concretos de resistência normal, o modelo BAZANT-BAWEJA B3 (1995) foi capaz de estimar com grande precisão a evolução da retração total. Já para os concretos de alta resistência, o modelo ACI 209R (2008) se mostrou bastante adequado para a previsão dessa propriedade para os concretos desse estudo.

## *Capítulo 7*

# *Fluência em concretos reciclados*

### *7.1. Revisão da literatura*

#### *7.1.1. Definições e estudos anteriores*

De acordo com a definição da ACI 209R-92, fluência é a deformação do concreto ao longo do tempo quando este é mantido sob uma carga constante. Esta deformação é crescente ao longo do tempo, porém sob uma taxa decrescente.

A fluência é um fenômeno bastante complexo que é afetado por diferentes fatores ligados basicamente às propriedades da pasta de cimento (porosidade, idade da pasta, temperatura de cura, composição do cimento, umidade e adições), aos parâmetros do concreto (teor de agregado, rigidez do agregado e massa específica) e aos fatores externos (tensão aplicada, umidade relativa, taxa de secagem, tempo de secagem) (TAM *et al.*, 2015).

Segundo a ACI 209R-92, existem dois tipos de fluência:

- a) Fluência básica: é a deformação que ocorre sem mudança de umidade, ou seja, sem a troca de água com o ambiente;
- b) Fluência por secagem: é uma deformação adicional causada pela secagem do concreto.

A fluência pode provocar danos significativos às estruturas de concretos, principalmente devido à indução de abertura de fissuras que podem prejudicar a durabilidade da estrutura. Ela também pode causar um aumento na deflexão de vigas de concreto ao longo do tempo. Porém, a fluência também apresenta benefícios, onde o principal deles é permitir que a estrutura se deforme lentamente, de forma a aliviar as tensões do concreto, evitando que a estrutura sofra uma ruptura dúctil (LATIF AL-MUFTI & FRIED, 2016).

As deformações sofridas pelos concretos sob carregamento constante são inversamente proporcionais ao módulo de elasticidade do concreto, ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade, menores tendem a ser as deformações por fluência desse mesmo concreto. Assim, as diferentes propriedades relacionadas ao módulo de elasticidade podem influenciar no comportamento de fluência dos concretos. Os concretos carregados em baixas idades tendem a apresentar deformações maiores que as apresentadas pelos mesmos concretos carregados com idade mais avançada, visto que nessa última situação, os concretos apresentam uma estrutura interna mais compacta e menos água disponível, devido às reações de hidratação.

Outro fator que tem grande influência no comportamento de fluência de concretos é a resistência à compressão. Como a resistência à compressão apresenta uma relação diretamente proporcional ao módulo de elasticidade, é fácil deduzir que a fluência é inversamente proporcional à resistência à compressão dos concretos.

Em relação aos agregados, muitos fatores ligados às propriedades intrínsecas dos agregados reciclados podem influenciar no comportamento de fluência dos concretos reciclados. Estas características estão relacionadas principalmente a qualidade do concreto de origem que pode ser medida através de propriedades físicas dos agregados, como absorção de água, massa específica e resistência à fragmentação.

LYE *et al.* (2016) fizeram um levantamento de 76 publicações no período de 1984-2014, de mais de 20 países para avaliar os principais fatores que afetam e como afetam a fluência de concretos reciclados. Nestes estudos, foram avaliados diferentes tipos de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, isto é, agregados provenientes de resíduos de concreto, de resíduos cerâmicos e de resíduos mistos. Além disso, neste levantamento, também foram incluídos os agregados miúdos reciclados. Com base nos dados selecionados, os autores observaram que 70% dos estudos mostraram um aumento na fluência com o uso de agregados reciclados. Porém, a maioria dos autores não forneceu nenhuma explicação para este fato ter ocorrido. Dos que forneceram esta informação, as causas mais comuns estavam relacionadas à argamassa aderida ao agregado, à elevada porosidade e absorção de água e ao baixo módulo de elasticidade.

Devido à argamassa aderida aos grãos, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados reduz o teor de agregado natural e aumenta o teor de argamassa

total do concreto (argamassa aderida somada com a argamassa fresca do “novo” concreto). Como consequência, a relação argamassa/concreto é maior nos concretos reciclados e isto pode ser considerado um dos principais fatores que provocam o aumento na fluência de concretos reciclados (FATHIFAZL *et al.*, 2011). Quando esta argamassa aderida é proveniente de um resíduo com fator água/cimento alto, sua porosidade e absorção de água também são elevadas, assim, quanto maior o teor de agregado reciclado produzido a partir deste resíduo na mistura, maior será a tendência do coeficiente de fluência aumentar em comparação com o concreto natural (TAM *et al.*, 2015).

### 7.1.2. Modelos de previsão

Existem diferentes modelos para a previsão da fluência em concretos. Dentre estes modelos, os mais estudados são: FIB MODEL CODE (2010), BAZANT-BAWEJA B3 (1995), CEB-FIP 90 (1990), GL2000 (2001) e ACI 209R-08 (2008). Esses modelos são os mesmos já apresentados no capítulo de retração autógena e por secagem (Capítulo 6).

O modelo EUROCODE 2 (2004) não apresenta formulações para prever as deformações por fluência ao longo do tempo de ensaio. Esse modelo apenas estima o coeficiente de fluência quando o tempo tende a infinito, através de gráficos que relacionam o tipo de cimento, as dimensões da amostra e a idade de carregamento. Portanto, esse modelo não será utilizado para a previsão da fluência básica dos concretos desse estudo.

#### FIB MODEL CODE (2010)

A deformação por fluência básica dos concretos pode ser calculada através da Equação (7.1).

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot \left[ \frac{1}{E_{ci}(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] \quad (7.1)$$

Onde:

$\sigma_c(t_0)$  é a tensão constante aplicada no tempo de início do ensaio;

$E_{ci}(t_0)$  é o módulo de elasticidade do concreto no tempo do início do ensaio;

$\varphi(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência básica, dado pela Equação (7.2);

$E_{ci}$  é o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias.

$$\varphi(t, t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t_0) \quad (7.2)$$

Onde:

$\beta_{bc}(f_{cm})$  é dado pela Equação (7.3);

$\beta_{bc}(t, t_0)$  é dado pela Equação (7.4).

$$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1,8}{(f_{cm})^{0,7}} \quad (7.3)$$

$$\beta_{bc}(t, t_0) = \ln \left( \left( \frac{30}{t_{0,adj}} + 0,035 \right)^2 \cdot (t - t_0) + 1 \right) \quad (7.4)$$

Na Equação (7.4), o termo  $t_{0,adj}$  é um coeficiente que ajusta o tempo de cura e o tipo de cimento utilizado. Assim, ele pode ser calculado pela Equação (7.5).

$$t_{0,adj} = t_{0,T} \cdot \left[ \frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right]^\alpha \quad (7.5)$$

Onde:

$t_{0,T}$  é a idade do concreto no dia do carregamento;

$\alpha$  é um coeficiente dependente do tipo de cimento. No caso de cimento de alta resistência inicial,  $\alpha$  é igual a 1,0.

### BAZANT-BAWEJA B3 (1995)

A deformação por fluência básica em concretos pode ser calculada através da Equação (7.6).

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0) \quad (7.6)$$

Onde:

$\sigma_c(t_0)$  é a tensão constante aplicada no início do carregamento;

$J(t, t_0)$  é a função que considera a deformação elástica e a deformação por fluência, dada pela Equação (7.7).

$$J(t, t_0) = q_1 + C_0(t, t_0) \quad (7.7)$$

Onde:

$q_1$  representa a deformação elástica sofrida durante o carregamento, que pode ser considerada igual a  $1/E_c(t_0)$ ;

$C_0(t, t_0)$  é a função de fluência básica, dada pela Equação (7.8).

$$C_0(t, t_0) = q_2 \cdot Q(t, t_0) + q_3 \cdot \ln[1 + (t - t_0)^n] + q_4 \cdot \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (7.8)$$

Onde:

$$q_2 = 185,4 \cdot 10^{-6} \cdot c^{0,5} \cdot f_{cm,28}^{-0,9} \quad (7.9)$$

$$Q(t, t_0) = Q_f(t_0) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{Q_f(t_0)}{Z(t, t_0)} \right)^{r(t_0)} \right]^{-1/r(t_0)} \quad (7.10)$$

$$Q_f(t_0) = [0,086 \cdot (t_0)^{2/9} + 1,21 \cdot (t_0)^{4/9}]^{-1} \quad (7.11)$$

$$Z(t, t_0) = (t_0)^{-m} \cdot \ln[1 + (t - t_0)^n] \quad (7.12)$$

$$r(t_0) = 1,7 \cdot (t_0)^{0,12} + 8 \quad (7.13)$$

$$q_3 = 0,29 \cdot (w/c)^4 \cdot q_2 \quad (7.14)$$

$$q_4 = 20,3 \cdot 10^{-6} (a/c)^{-0,7} \quad (7.15)$$

Onde:

$c$  é o consumo de cimento;

$m$  e  $n$  são coeficientes empíricos que podem ser aproximados para  $m=0,5$  e  $n=0,1$ ;

$w/c$  é o fator água/cimento;

$a/c$  é a relação entre agregados/cimento.

CEB-FIP 90 (1990)

A deformação por fluência básica em concretos pode ser calculada através da Equação (7.16):

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0) \quad (7.16)$$

Onde:

$\sigma_c(t_0)$  é a tensão constante aplicada no início do carregamento;

$J(t, t_0)$  é a função que considera a deformação elástica e a deformação por fluência, dada pela Equação (7.17).

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_{cm t_0}} + \frac{\Phi_{28}(t, t_0)}{E_{cm 28}} \quad (7.17)$$

Onde:

$\Phi_{28}(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência básica aos 28 dias, dado pela Equação (7.18);

$E_{cm t_0}$  é o módulo de elasticidade do concreto na idade do carregamento;

$E_{cm 28}$  é o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias.

$$\Phi_{28}(t, t_0) = \Phi_0 \beta_c(t - t_0) \quad (7.18)$$

Onde:

$\Phi_0$  é um termo relativo ao coeficiente de fluência, dado pelo Equação (7.19)

$\beta_c(t - t_0)$  é a função de tempo que descreve a evolução das deformações por fluência, dada pela Equação (7.23).

$$\Phi_0 = \beta(f_{cm 28}) \cdot \beta(t_0) \quad (7.19)$$

Onde:

$$\beta(f_{cm 28}) = \frac{5,3}{\sqrt{f_{cm 28}/f_{cm 0}}} \quad (7.20)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + (t_0/t_1)^{0,2}} \quad (7.21)$$

Onde:

$f_{cm0}$  é a resistência à compressão na idade do carregamento;

$t_0$  é a idade do carregamento, que pode ser corrigida pela Equação (7.22);

$t_1$  é igual a 1 dia.

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left[ \frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right]^\alpha \quad (7.22)$$

Onde:

$t_{0,T}$  é a idade do concreto no dia do carregamento;

$\alpha$  é um coeficiente dependente do tipo de cimento. No caso de cimento de alta resistência inicial,  $\alpha$  é igual a 1,0.

$$\beta_c(t - t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0,3} \quad (7.23)$$

Onde:

$$\beta_H = 150 \cdot [1 + (1,2 \cdot h/h_0)^{18}] \cdot V/S / (V/S)_0 + 250 \quad (7.24)$$

Os efeitos da secagem foram desconsiderados nas equações apresentadas acima.

#### GL2000 (2001)

A deformação por fluência básica em concretos pode ser calculada através da Equação (7.25):

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0) \quad (7.25)$$

Onde:

$\sigma_c(t_0)$  é a tensão constante aplicada no início do carregamento;



$J(t, t_0)$  é a função que considera a deformação elástica e a deformação por fluência, dada pela Equação (7.26).

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_{cmt0}} + \frac{\Phi_{28}(t, t_0)}{E_{cm28}} \quad (7.26)$$

Onde:

$\Phi_{28}(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência básica aos 28 dias, dado pela Equação (7.27);

$E_{cmt0}$  é o módulo de elasticidade do concreto na idade do carregamento;

$E_{cm28}$  é o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias.

$$\Phi_{28}(t, t_0) = \Phi(t_c) \left[ 2 \cdot \frac{(t - t_0)^{0,3}}{(t - t_0)^{0,3} + 14} + \left(\frac{7}{t_0}\right)^{0,5} \left(\frac{(t - t_0)}{(t - t_0) + 7}\right)^{0,5} \right] \quad (7.27)$$

Onde:

$\Phi(t_c)$  é um fator de correção para os efeitos da secagem antes do carregamento, caso não haja secagem, esse termo pode ser considerado igual a 1,0.

Na equação original do modelo, o coeficiente de fluência contém uma parcela que considera os efeitos da secagem, mas como o objetivo desse estudo é avaliar somente a fluência básica de concretos, esse termo foi suprimido na Equação (7.27).

#### ACI 209R-08 (2008)

A deformação por fluência básica em concretos pode ser calculada através da Equação (7.16):

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0) \quad (7.28)$$

Onde:

$\sigma_c(t_0)$  é a tensão constante aplicada no início do carregamento;

$J(t, t_0)$  é a função que considera a deformação elástica e a deformação por fluência, dada pela Equação (7.29).

$$J(t, t_0) = \frac{1 + \Phi(t, t_0)}{E_{cmt0}} \quad (7.29)$$

Onde:

$\Phi(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência, dado pela Equação (7.30).

$$\Phi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^\psi}{d + (t - t_0)^\psi} \cdot \Phi_u \quad (7.30)$$

Onde:

$\psi$  é uma constante que considera a forma e as dimensões da amostra, que pode ser considerado igual a 1,0;

$d$  é uma constante dada pela Equação (7.31);

$\Phi_u$  é o coeficiente de fluência último. Segundo o modelo, esse coeficiente pode ser considerado igual a 2,35 como uma boa aproximação.

$$d = 26,0 \cdot e^{\{1,42 \cdot 10^{-2} \cdot (V/S)\}} \quad (7.31)$$

Portanto, com base nessa revisão de literatura, nota-se que apesar de ser uma importante propriedade do concreto, a fluência ainda precisa ser mais bem compreendida, principalmente em relação aos principais fatores que influenciam esta propriedade. A maioria dos estudos desenvolvidos até o momento ainda consideram o teor de agregado reciclado como o aspecto principal que afeta a fluência, porém ele não pode ser considerado o único parâmetro a ser estudado. A idade de carregamento e a classe de resistência também são variáveis de extrema importância nessa propriedade. Dessa forma, esse estudo visa avaliar as deformações por fluência básica na compressão em concretos naturais e reciclados de resistência normal e alta resistência, com diferentes idades de carregamento e comparar os resultados com os modelos de previsão apresentados na revisão de literatura. Para isso, esse estudo foi dividido em duas partes: na primeira, são avaliadas as curvas de elevação adiabática de temperatura desses concretos, de forma a definir duas idades para o término da cura térmica e início do carregamento de fluência; na segunda, são analisadas as curvas experimentais de deformação por fluência básica na compressão e as possíveis correlações com modelos da literatura.

## ***7.2. Parte A: Desenvolvimento da hidratação nos concretos***

Antes de iniciar, de fato, o estudo sobre a fluência em concretos reciclados, foi realizado um estudo preliminar de hidratação, de forma a determinar em que momento a cura dos concretos seria interrompida para que fosse realizado o carregamento de fluência. As amostras de fluência foram curadas em banho térmico cuja rampa de temperatura acompanhava a elevação adiabática de temperatura proveniente da hidratação do cimento. Essa metodologia será explicada com mais detalhes na Parte B desse capítulo (seção 7.3).

Nessa seção são apresentados os materiais e métodos utilizados na parte de hidratação desse estudo, assim como os resultados obtidos através do ensaio de elevação adiabática de temperatura.

### ***7.2.1. Materiais e métodos***

Nessa seção é apresentada a metodologia utilizada para a determinação dos graus de hidratação dos concretos naturais e reciclados em que serão submetidos ao carregamento de fluência, com base na curva de elevação adiabática de temperatura. Dessa forma, são apresentados os materiais utilizados e a composição das misturas que já foram apresentadas em capítulos anteriores, mas, para facilitar o entendimento do capítulo, são referenciados novamente. Por fim, são descritos os procedimentos empregados para a determinação do grau de hidratação desses concretos.

#### ***7.2.1.1. Caracterização dos materiais***

A caracterização dos materiais utilizados nessa parte do estudo foi apresentada no Capítulo 2 e no Capítulo 3. Foram utilizados os seguintes materiais:

- Nat\_B1;
- RCA\_D\_B1;
- Nat\_B0;
- Areia natural;
- Cimento CPV-ARI;
- Superplastificante;
- Água.

### 7.2.1.2. *Dosagem e composição das misturas*

A composição das misturas realizadas nesse capítulo foi apresentada na Tabela 3.7, na seção 3.2.2. São elas:

- C35-NAT;
- C35-D-B1;
- C60-NAT;
- C60-D-B1;

Conforme já apresentado anteriormente, foi utilizado um método de dosagem científica (Modelo de Empacotamento Compressível) e adotado um método de compensação de água de absorção dos agregados reciclados equivalente a 50% da absorção total durante o processo de mistura. Dessa forma, evita-se que os agregados reciclados absorvam a água da mistura necessária para as reações de hidratação.

### 7.2.1.3. *Método de ensaio*

Para a avaliação do grau de hidratação do cimento de cada um dos concretos do estudo, foi realizado o ensaio de elevação adiabática de temperatura. A metodologia utilizada foi semelhante à descrita na seção 5.2.3. Com o objetivo de retardar a evolução da hidratação para facilitar o processo de carregamento da fluência, adotou-se uma temperatura inicial para o ensaio de  $10^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

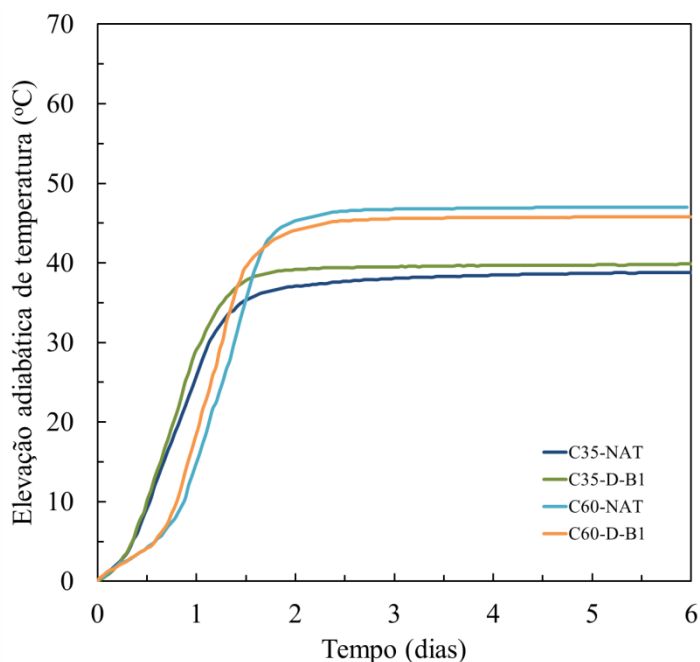
Os materiais sólidos foram pesados no dia anterior à moldagem e colocados em um ambiente com temperatura de  $4^{\circ}\text{C}$ . Os materiais líquidos foram colocados em embalagens fechadas no mesmo ambiente, mas somente foram pesados imediatamente antes do início da mistura.

Durante o processo de mistura, o ar condicionado da sala foi mantido na temperatura mínima ( $17^{\circ}\text{C}$ ) e o misturador foi colocado próximo à entrada da sala de  $4^{\circ}\text{C}$ . Essa metodologia adotada visava manter os materiais na temperatura mais baixa possível para se iniciar o ensaio de elevação adiabática de temperatura.

Os calorímetros adiabáticos foram resfriados com o uso de gelo (antes do início do ensaio) e do resfriamento automático do próprio equipamento (após o início do ensaio).

### 7.2.2. Apresentação e análise dos resultados

A Figura 7.1 apresenta as curvas de elevação adiabática de temperatura para os concretos naturais e reciclados dessa parte do estudo.



**Figura 7.1 – Curvas de elevação adiabática de temperatura para os concretos naturais e reciclados do estudo de fluência**

Conforme mostrado na seção de análise dos resultados do capítulo de hidratação (seção 5.3), através do grau de hidratação final do cimento e das curvas de elevação adiabática de temperatura, é possível calcular a evolução do grau de hidratação em função do tempo. Assim, os dados do ensaio de elevação adiabática de temperatura desse capítulo e a curva do grau de hidratação do cimento normalizado em função do tempo são apresentados na Tabela 7.1 e na Figura 7.2.

O grau de hidratação máximo do cimento para cada um dos concretos é o mesmo já calculado no Capítulo 5, visto que a temperatura inicial do ensaio interfere apenas na cinética de hidratação e não na hidratação final.

Portanto, com base nas curvas apresentadas na Figura 7.2, foram escolhidas duas idades para iniciar o ensaio de fluência. Optou-se por escolher essas idades baseadas na curva de grau de hidratação normalizado, visto que representaria melhor o mesmo instante da curva para todas as misturas. Essas idades e toda a metodologia aplicada no estudo de fluência serão apresentadas na Parte B desse capítulo (seção 7.3).

Tabela 7.1 – Dados do ensaio de elevação adiabática de temperatura para os concretos dessa parte do estudo

Misturas	Temperatura inicial (°C)	Elevação adiabática de temperatura final (°C)	Coefficiente de elevação adiabática (°C.m <sup>3</sup> /kg)	Grau de hidratação máximo do cimento
C35-NAT	10,2	38,8	0,119	0,86
C35-D-B1	10,4	39,9	0,117	0,85
C60-NAT	10,1	47,0	0,105	0,66
C60-D-B1	10,3	45,8	0,099	0,62

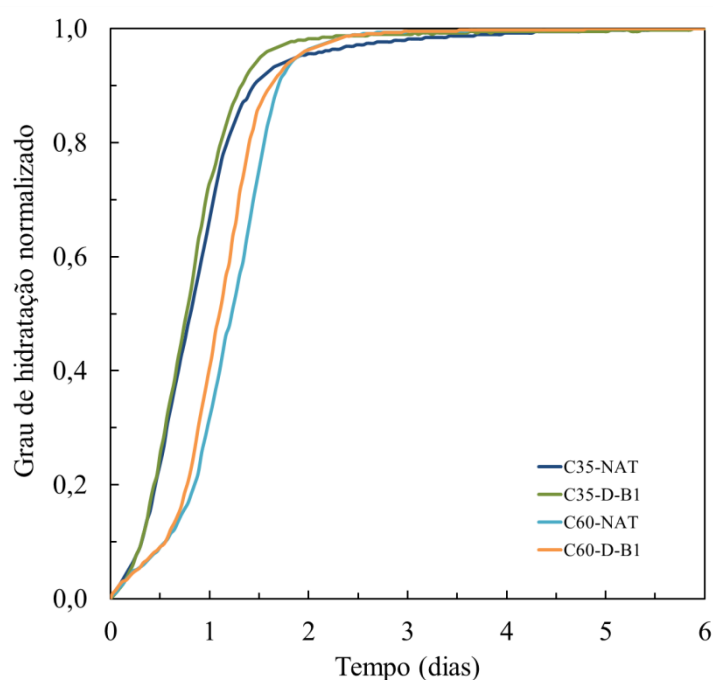


Figura 7.2 – Grau de hidratação normalizado em função do tempo para todas as misturas dessa parte do estudo

### 7.3. Parte B: Fluência na compressão em concretos

Nessa seção são apresentadas as metodologias utilizadas para a avaliação da fluência na compressão, assim como os resultados experimentais obtidos e a comparação feita com os modelos de previsão apresentados na revisão de literatura.

### **7.3.1. *Materiais e métodos***

Essa seção apresenta a metodologia empregada para o estudo de fluência na compressão em concretos reciclados. São detalhados os procedimentos de cura das amostras e os métodos de ensaio utilizados.

#### **7.3.1.1. *Caracterização dos materiais e dosagem e composição das misturas***

Conforme já apresentado nesse capítulo, os materiais e as composições das misturas foram as mesmas dos ensaios de elevação adiabática de temperatura da Parte A (seção 7.2) desse estudo.

#### **7.3.1.2. *Cura dos concretos***

A preparação dos materiais e os procedimentos adotados durante o processo de mistura foram os mesmos já apresentados na Parte A desse capítulo, ou seja, os materiais foram mantidos resfriados por 24 horas antes do início da mistura e a temperatura da sala foi mantida baixa durante o processo de mistura.

Ao final do processo de mistura, foi moldada novamente uma amostra para o calorímetro adiabático de temperatura. Além disso, as amostras para ensaio de fluência e resistência à compressão foram colocadas em um banho térmico cujo controlador de temperatura era ligado ao controlador do calorímetro adiabático. Dessa forma, à medida que a temperatura do calorímetro adiabático aumentava, devido às reações de hidratação, a temperatura do banho térmico também aumentava seguindo a mesma rampa.

Assim, as amostras foram curadas até o tempo determinado para o início do ensaio de fluência.

#### **7.3.1.3. *Métodos de ensaio – Fluência e resistência à compressão***

O ensaio de fluência foi realizado em corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 300 mm de altura, conforme as prescrições da ABNT NBR 8224 (2012).

Foram moldados quatro corpos de prova, sendo dois submetidos ao carregamento e os outros dois como controle, nos quais foram medidas as suas deformações. Além disso, foram moldados mais quatro corpos de prova para ensaio de resistência à compressão, de forma a verificar a carga que seria aplicada no carregamento de fluência.

Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados em banho térmico e mantidos nos moldes até o início da preparação para os ensaios.

O tempo de início do ensaio de fluência foi determinado com base no ensaio de elevação adiabática de temperatura, mostrado na parte A desse capítulo. Como o objetivo principal desse estudo era avaliar o comportamento dos concretos reciclados em diferentes idades de carregamento (e conseqüentemente, graus de hidratação distintos), foram escolhidos dois pontos bem distantes na curva de grau de hidratação normalizado em função do tempo (Figura 7.2). Assim, foram definidos os graus de hidratação normalizados de 0,2 e 1,0 para as misturas de baixa hidratação e de hidratação avançada, respectivamente.

Nesse capítulo, foi necessário incluir o grau de hidratação normalizado na nomenclatura das misturas, de forma a diferenciar as misturas da classe de hidratação baixa das misturas da classe alta. Essa nova nomenclatura, assim como o grau de hidratação normalizado e o grau de hidratação do cimento ao final da cura de cada mistura é mostrado na Tabela 7.2.

**Tabela 7.2 – Nova nomenclatura das misturas, grau de hidratação normalizado e grau de hidratação do cimento definidos para o final da cura dos concretos do estudo de fluência**

	<b>Misturas</b>	<b>Grau de hidratação normalizado</b>	<b>Grau de hidratação do cimento</b>
<b>Baixa hidratação</b>	<b>C35-NAT-0,2</b>	0,2	0,18
	<b>C35-D-B1-0,2</b>	0,2	0,17
	<b>C60-NAT-0,2</b>	0,2	0,13
	<b>C60-D-B1-0,2</b>	0,2	0,13
<b>Hidratação avançada</b>	<b>C35-NAT-1,0</b>	1,0	0,86
	<b>C35-D-B1-1,0</b>	1,0	0,85
	<b>C60-NAT-1,0</b>	1,0	0,66
	<b>C60-D-B1-1,0</b>	1,0	0,62

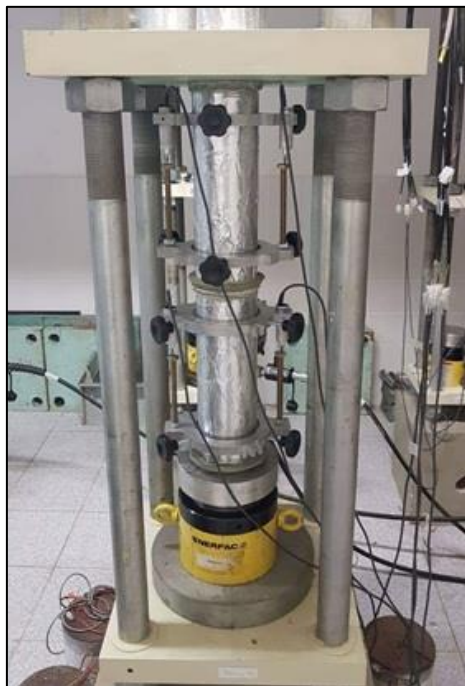
Ao final da cura, as amostras para ensaio de fluência foram desmoldadas e seladas com filme plástico e fita de alumínio. Esse procedimento evita que os corpos de prova sofram deformações provocadas por secagem do concreto. Assim, após a selagem das amostras, os dois corpos de prova que foram submetidos ao carregamento foram posicionados um sobre o outro verticalmente no pórtico juntamente com o atuador



hidráulico. O posicionamento adequado foi verificado com o auxílio de um nível colocado na placa superior do pórtico. A Figura 7.3 mostra o posicionamento dos corpos de prova de fluência durante o ensaio.

A carga aplicada aos concretos foi correspondente a 40% da tensão de ruptura, obtida através dos ensaios de resistência à compressão na mesma idade do carregamento. As amostras foram mantidas sob carga constante durante 90 dias e, após esse período, os corpos de prova foram descarregados e as leituras foram realizadas por mais 30 dias.

Os dois corpos de prova de controle foram importantes para obter as deformações autógena e térmica e descontar estas deformações das apresentadas pelos corpos de prova submetidos ao carregamento, garantindo assim, que somente as deformações de fluência estavam sendo consideradas. As deformações dos corpos de prova sob carregamento foram medidas através de LVDTs semelhantes aos usados nos ensaios de resistência à compressão.



**Figura 7.3 – Detalhe do ensaio de fluência na compressão em uma das misturas desse estudo**

A deformação por fluência foi calculada pela Equação (7.1):

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_t - \varepsilon_i - \varepsilon_s \quad (7.1)$$

Onde:

$\varepsilon_{cc}$  é a deformação por fluência;

$\varepsilon_t$  é a deformação total a partir da leitura de referência, nos corpos de prova sob carregamento;

$\varepsilon_i$  é a deformação imediata medida no momento da aplicação da carga;

$\varepsilon_s$  é a deformação média dos corpos de prova de controle (deformações autógena + térmica)

Por fim, o comportamento de fluência sob esforços de compressão é semelhante ao mostrado na Figura 7.4. Neste gráfico, observa-se uma deformação específica imediata provocada pelo carregamento seguida pela deformação de fluência que ocorre durante o ensaio. Após o descarregamento, ocorre uma recuperação imediata de deformação até a estabilização da deformação permanente.

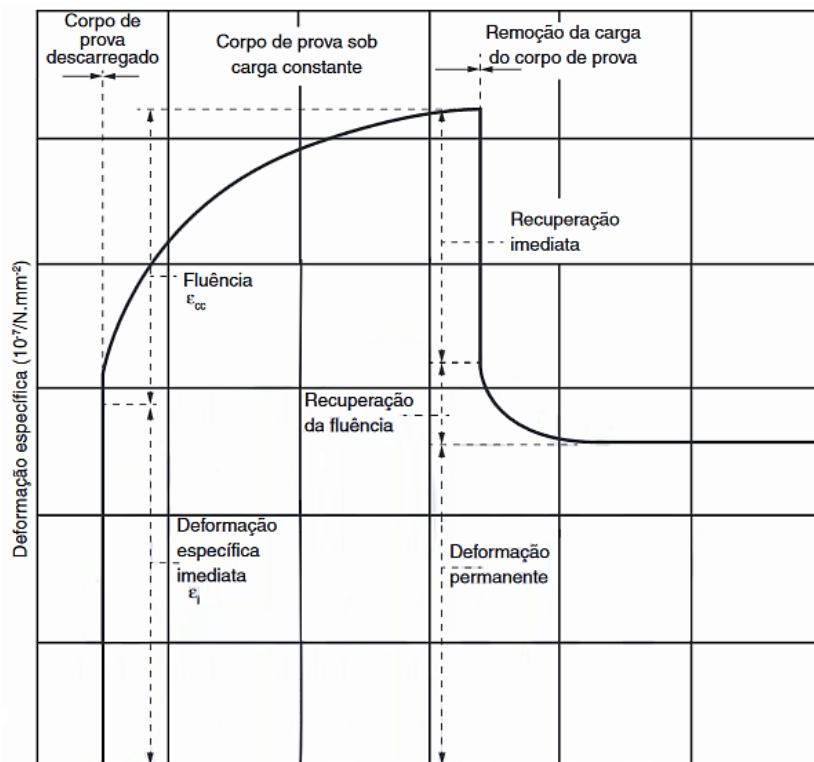


Figura 7.4 – Deformações de fluência durante e após o carregamento (ABNT NBR 8224, 2012)

### 7.3.2. Apresentação e análise dos resultados

A Tabela 7.3 apresenta os tempos de cura, os resultados de resistência à compressão e a carga aplicada na fluência para todos os concretos desse estudo. Conforme descrito na metodologia, as amostras de fluência foram submetidas ao carregamento nas idades equivalentes aos graus de hidratação normalizados iguais a 0,2 e 1,0. Dessa forma, os

tempos de cura foram de 12 horas para as misturas de resistência normal com baixo grau de hidratação, aproximadamente 20 horas para as mistura de alta resistência com baixo grau de hidratação e 6 dias para todas as misturas com alto grau de hidratação. Esses tempos se referem ao instante em que foi interrompida a cura térmica e iniciados os procedimentos para o carregamento de fluência. O tempo decorrido entre o término da cura e o carregamento de fluência foi inferior à uma hora para todos os concretos.

A carga aplicada no ensaio de fluência foi equivalente a 40% da carga de ruptura de amostras curadas nas mesmas condições, de forma a manter as deformações de fluência dentro do regime elástico do concreto.

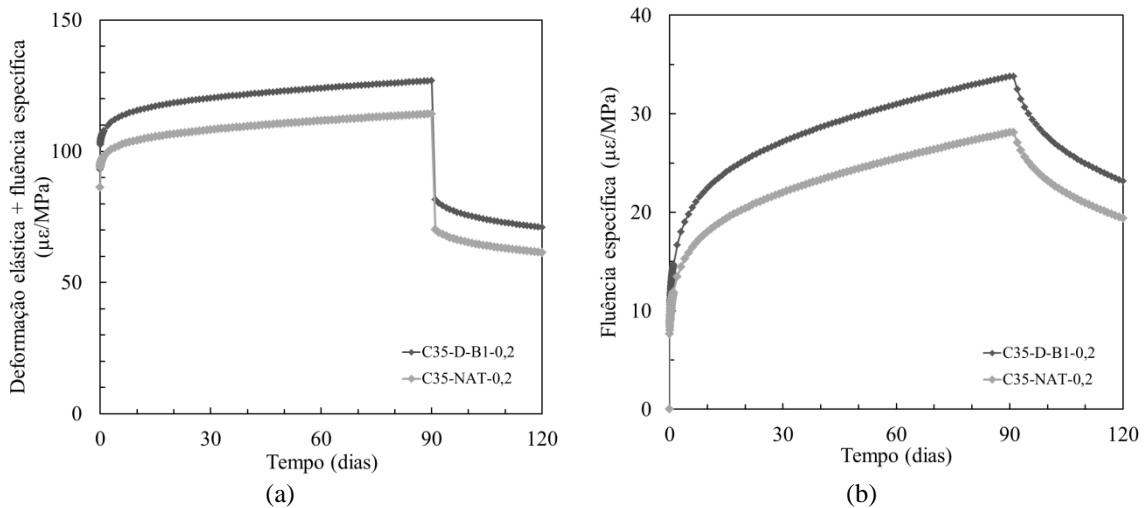
**Tabela 7.3 – Tempo de cura térmica, resistência à compressão e carga aplicada no ensaio de fluência para todos os concretos**

Misturas	Tempo de cura	Resistência à compressão (MPa)	Carga aplicada (MPa)
<b>C35-NAT-0,2</b>	12 horas	6,9 ( $\pm$ 6,7%)	2,8
<b>C35-D-B1-0,2</b>	12 horas	6,4 ( $\pm$ 7,1%)	2,6
<b>C60-NAT-0,2</b>	20 horas	11,9 ( $\pm$ 4,5%)	4,8
<b>C60-D-B1-0,2</b>	19 horas	11,6 ( $\pm$ 5,8%)	4,6
<b>C35-NAT-1,0</b>	6 dias	33,3 ( $\pm$ 4,7%)	13,3
<b>C35-D-B1-1,0</b>	6 dias	32,8 ( $\pm$ 5,3%)	13,1
<b>C60-NAT-1,0</b>	6 dias	57,4 ( $\pm$ 4,1%)	23,0
<b>C60-D-B1-1,0</b>	6 dias	56,7 ( $\pm$ 5,9%)	22,7

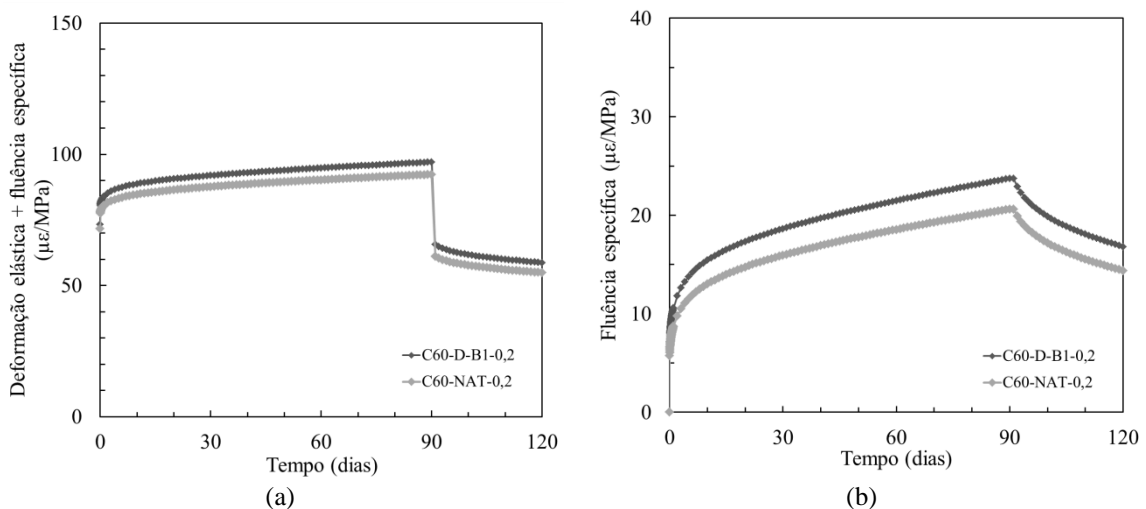
As curvas de fluência básica na compressão são apresentadas na Figura 7.5, na Figura 7.6, na Figura 7.7 e na Figura 7.8 para os concretos de resistência normal e de alta resistência carregados com baixo grau de hidratação e de resistência normal e de alta resistência carregados com alto grau de hidratação, respectivamente. Conforme descrito na metodologia experimental, as curvas foram obtidas através da média das deformações de dois corpos de prova selados mantidos sob carregamento constante, descontando-se as deformações provenientes de variação térmica e retração autógena medidas em dois corpos de prova de controle.

Visando permitir uma comparação entre o comportamento de todos os concretos, os valores de deformação das curvas são apresentados em forma de fluência específica, ou seja, eles representam a relação entre os valores de deformação absoluta e a tensão

aplicada. Nota-se que são utilizados dois tipos de curvas para a avaliação das deformações de fluência. Na primeira, são mostradas as deformações elásticas durante o carregamento e o descarregamento e as deformações de fluência específica. Na segunda estão representadas somente as deformações por fluência específica.



**Figura 7.5 – Fluência básica na compressão para os concretos de resistência normal carregados com baixo grau de hidratação: (a) com fase elástica e (b) sem fase elástica**



**Figura 7.6 – Fluência básica na compressão para os concretos de alta resistência carregados com baixo grau de hidratação: (a) com fase elástica e (b) sem fase elástica**

Através da análise das curvas, é possível observar duas regiões bem distintas: na primeira, as deformações correspondem ao período de carregamento, na qual podem ser obtidos o módulo de elasticidade dos concretos no momento do carregamento (deformação elástica), as deformações por fluência ao longo do período de carregamento e o coeficiente de fluência aos 90 dias de ensaio (idade em que ocorreu o descarregamento de todas as misturas); a segunda região corresponde ao período de

descarregamento, na qual é possível calcular o módulo de elasticidade dos concretos no momento do descarregamento e as deformações de recuperação da fluência.

A análise das curvas apresentadas na Figura 7.5 e na Figura 7.6 permite concluir que as deformações por fluência são maiores nos concretos de resistência normal do que nos concretos de alta resistência. Em ambos os casos, os concretos reciclados apresentaram maiores deformações tanto no período de carregamento quanto no período após o descarregamento. A Tabela 7.4 apresenta os valores de módulo de elasticidade no instante de aplicação da carga e no momento de descarregamento, assim como os valores de fluência específica ao final do carregamento e a fluência permanente 30 dias após o descarregamento.

**Tabela 7.4 – Módulo de elasticidade e fluência específica durante o carregamento e após o descarregamento para todos os concretos**

Misturas	Carregamento		Descarregamento	
	Módulo de elasticidade (GPa)	Fluência específica aos 90 dias ( $\mu\epsilon/\text{MPa}$ )	Módulo de elasticidade (GPa)	Fluência permanente aos 120 dias ( $\mu\epsilon/\text{MPa}$ )
<b>C35-NAT-0,2</b>	11,5	28	22,7	19
<b>C35-D-B1-0,2</b>	10,8	34	22,1	23
<b>C60-NAT-0,2</b>	13,5	21	32,1	14
<b>C60-D-B1-0,2</b>	13,1	24	31,9	17
<b>C35-NAT-1,0</b>	20,8	18	23,1	12
<b>C35-D-B1-1,0</b>	20,1	21	22,9	14
<b>C60-NAT-1,0</b>	28,6	13	33,4	8
<b>C60-D-B1-1,0</b>	28,2	16	32,9	10

Nota-se que o módulo de elasticidade inicial (na idade do carregamento) foi de 11,5 GPa para a mistura C35-NAT-0,2 e 10,8 GPa para o concreto C35-D-B1-0,2, enquanto na idade do descarregamento (aproximadamente 90 dias), essas misturas apresentaram módulo de elasticidade final de 22,7 e 22,1 GPa, respectivamente. Como essa é uma propriedade diretamente relacionada à resistência à compressão e os concretos reciclados apresentaram menores valores de resistência inicial, era esperado que seu módulo de elasticidade inicial também fosse inferior ao dos concretos naturais. Em relação às deformações por fluência, observa-se que os concretos reciclados

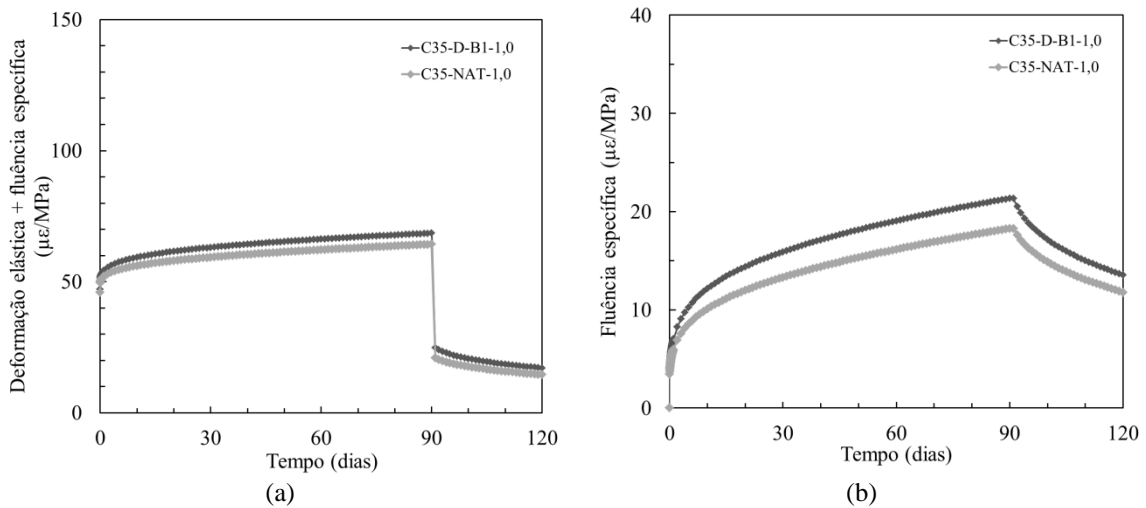
apresentaram maiores valores de fluência específica aos 90 dias, onde o concreto C35-NAT-0,2 teve uma deformação igual a  $28 \mu\epsilon/\text{MPa}$  e o C35-D-B1-0,2 teve  $34 \mu\epsilon/\text{MPa}$  de deformação por fluência específica.

Comportamento semelhante foi apresentado pelas misturas de alta resistência carregadas com baixo grau de hidratação, onde os módulos de elasticidade inicial e final foram ligeiramente menores para os concretos reciclados e a deformação por fluência específica aos 90 dias foi maior para o concreto reciclado.

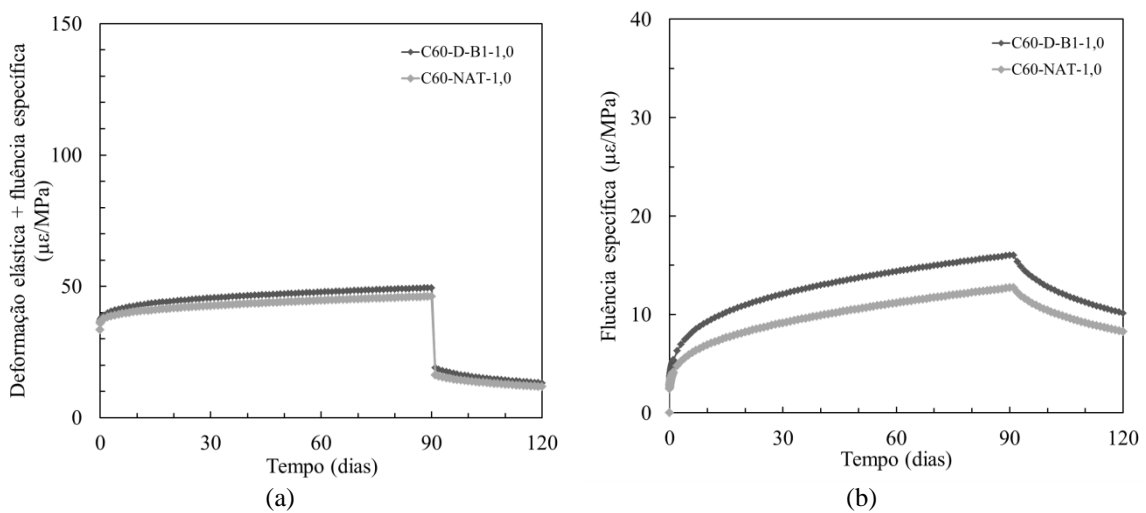
Em relação à recuperação por fluência 30 dias após o descarregamento (ou seja, com 120 dias de ensaio), apesar do concreto reciclado C35-D-B1-0,2 apresentar uma recuperação por fluência maior que o C35-NAT-0,2, sua fluência permanente foi maior que a apresentada pelo concreto natural (isto é,  $23 \mu\epsilon/\text{MPa}$  para o reciclado e  $19 \mu\epsilon/\text{MPa}$  para o natural). Para os concretos de alta resistência, a recuperação por fluência foi a mesma tanto para o concreto natural quanto para o concreto reciclado. Dessa forma, como o concreto C60-D-B1-0,2 já havia apresentado maior deformação por fluência aos 90 dias, sua fluência permanente após 30 dias de descarregamento também foi maior que a do concreto C60-NAT-0,2.

A Figura 7.7 e a Figura 7.8 mostram as deformações por fluência específica com e sem fase elástica para os concretos de resistência normal e de alta resistência carregados com alto grau de hidratação, respectivamente. Os valores de módulo de elasticidade inicial e final, as deformações por fluência específica 90 dias após o carregamento e a fluência permanente 30 dias após o descarregamento para esses concretos são mostrados na Tabela 7.4.

Nota-se, através da observação das curvas, que assim como visto para os concretos carregados com baixo grau de hidratação, os concretos reciclados apresentaram maiores deformações por fluência específica que os concretos naturais. Isso mostra que, independente da carga inicial aplicada, os concretos reciclados tendem a se deformar mais por fluência sob compressão que os concretos contendo somente agregados naturais. Apesar desse fato se apresentar como um ponto positivo, pois permite que a estrutura de concreto se deforme lentamente, aliviando as tensões que poderiam provocar uma ruptura, ele também pode induzir à formação de fissuras que podem prejudicar a durabilidade da estrutura.



**Figura 7.7 – Fluência básica na compressão para os concretos de resistência normal carregados com alto grau de hidratação: (a) com fase elástica e (b) sem fase elástica**



**Figura 7.8 – Fluência básica na compressão para os concretos de alta resistência carregados com alto grau de hidratação: (a) com fase elástica e (b) sem fase elástica**

A análise dos valores apresentados na Tabela 7.4 permite notar que os módulos de elasticidade inicial e final dos concretos reciclados foram ligeiramente menores que os apresentados pelos concretos naturais, em ambas as classes de resistência. Assim como ocorrido para os concretos carregados com baixo grau de hidratação, nesse caso, os concretos reciclados também apresentaram menores valores de resistência à compressão inicial que os concretos naturais e consequentemente, menores valores de módulo de elasticidade. Além disso, apesar de apresentarem valores de resistência à compressão no momento do carregamento próximos aos valores de resistência à compressão aos 28 dias em cura úmida, os valores de módulo de elasticidade inicial foram menores que os apresentados no Capítulo 3. Essa diferença pode ser explicada pela diferença na

velocidade de aplicação da carga, onde durante o ensaio de resistência à compressão a aplicação da carga é muito mais lenta do que durante o carregamento de fluência.

Em relação à fluência específica aos 90 dias de ensaio, observa-se que o concreto C35-NAT-1,0 apresentou 18  $\mu\epsilon$ /MPa de deformação e o concreto C35-D-B1-1,0 apresentou 21  $\mu\epsilon$ /MPa de fluência específica. Comportamento semelhante foi observado para os concretos de alta resistência, onde o C60-NAT-1,0 apresentou 13  $\mu\epsilon$ /MPa e o C60-D-B1-1,0 apresentou 16  $\mu\epsilon$ /MPa de fluência específica aos 90 dias. Dessa forma, conforme observado para os concretos carregados com baixo grau de hidratação, os concretos reciclados das duas classes de resistência apresentaram maiores valores de fluência específica aos 90 dias que os concretos naturais de suas classes.

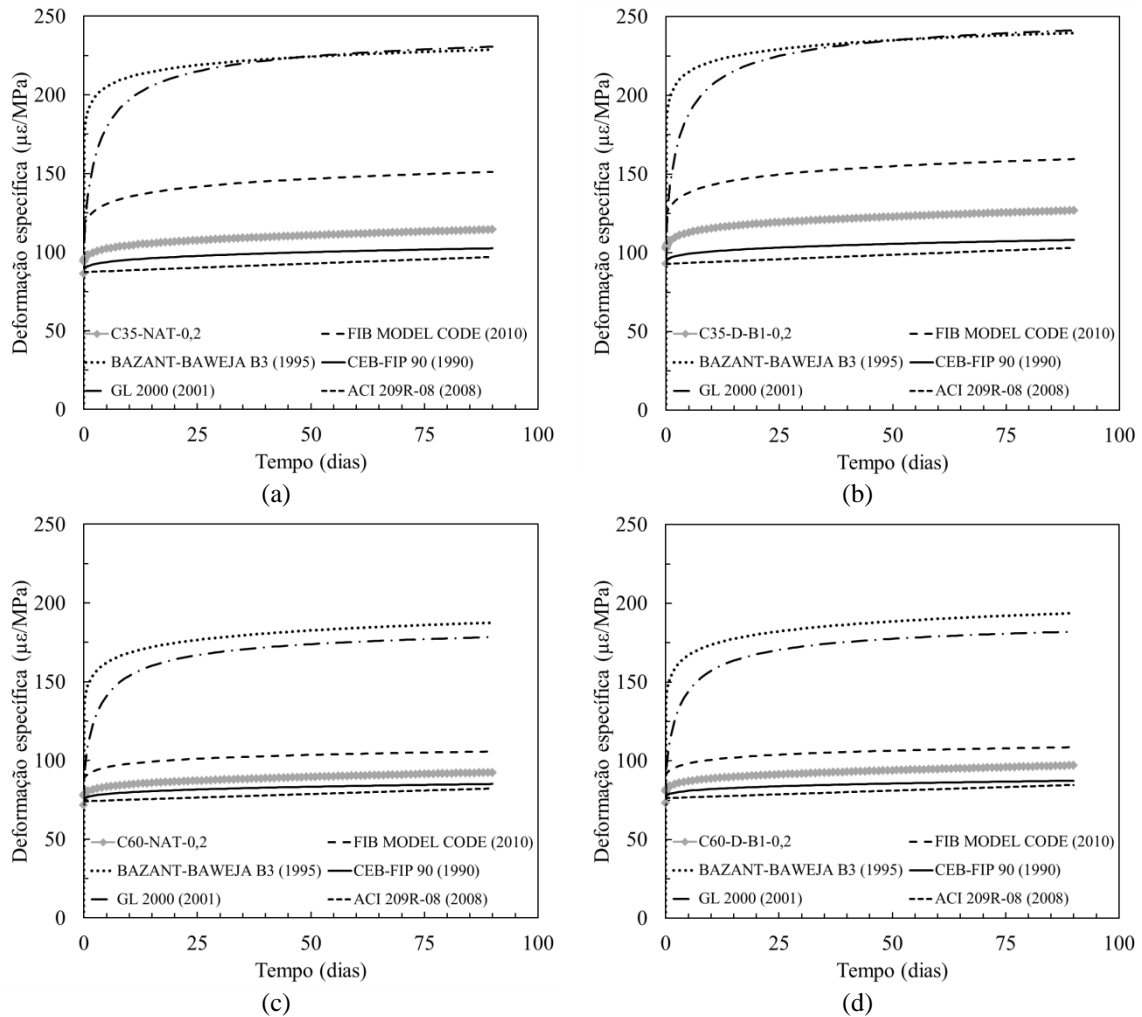
A recuperação por fluência também foi maior para os concretos reciclados em ambas as classes de resistência, porém isso não foi suficiente para que a deformação permanente 30 dias após o descarregamento fosse menor para os concretos reciclados. Assim, os concretos reciclados apresentaram uma deformação residual maior que os concretos naturais, tanto para os concretos de resistência normal quanto para os concretos de alta resistência.

Portanto, de forma geral, a fluência dos concretos carregados a baixas idades foi maior nas primeiras semanas de carregamento quando comparada com concretos carregados a idades maiores. Conforme visto na revisão da literatura, esse comportamento é provocado pelo maior grau de hidratação apresentado pelos concretos carregados com maiores idades, que apresentam estrutura interna mais compacta e menos porosa. Além disso, a fluência em concretos de resistência normal foi maior que a apresentada pelos concretos de alta resistência. Esse fato pode estar relacionado ao menor módulo de elasticidade apresentado por esses concretos que interfere diretamente nas deformações por fluência. Por fim, a utilização de agregados reciclados provocou um aumento nas deformações de fluência, independente da classe de resistência e da idade de carregamento.

Visando complementar a análise do comportamento de fluência na compressão dos concretos desse estudo, as curvas de deformação específica (deformação elástica + deformação por fluência básica) experimentais foram comparadas com as curvas de alguns modelos de previsão existentes na literatura. Essa comparação é apresentada na



Figura 7.9 para os concretos carregados com baixo grau de hidratação e na Figura 7.10 para os concretos carregados com alto grau de hidratação.



**Figura 7.9 – Comparação entre as curvas de deformação elástica + fluência básica no tempo e as curvas previstas pelos modelos de previsão da literatura: (a) C35-NAT-0,2; (b) C35-D-B1-0,2; (c) C60-NAT-0,2 e (d) C60-D-B1-0,2**

Conforme apresentado na revisão da literatura, esses modelos estimam o comportamento de fluência somente durante o período de carregamento. Assim, as curvas são mostradas somente até os 90 dias de ensaio. Além disso, os modelos não consideram o grau de hidratação como parâmetro para início do carregamento, ou seja, eles consideram a idade de carregamento como o período do término da cura úmida, em dias. Assim, com base nos valores de resistência à compressão inicial no momento do carregamento foram aproximados como idade de carregamento as idades de 1 e 28 dias para os concretos de baixo grau de hidratação e de alto grau de hidratação, respectivamente.

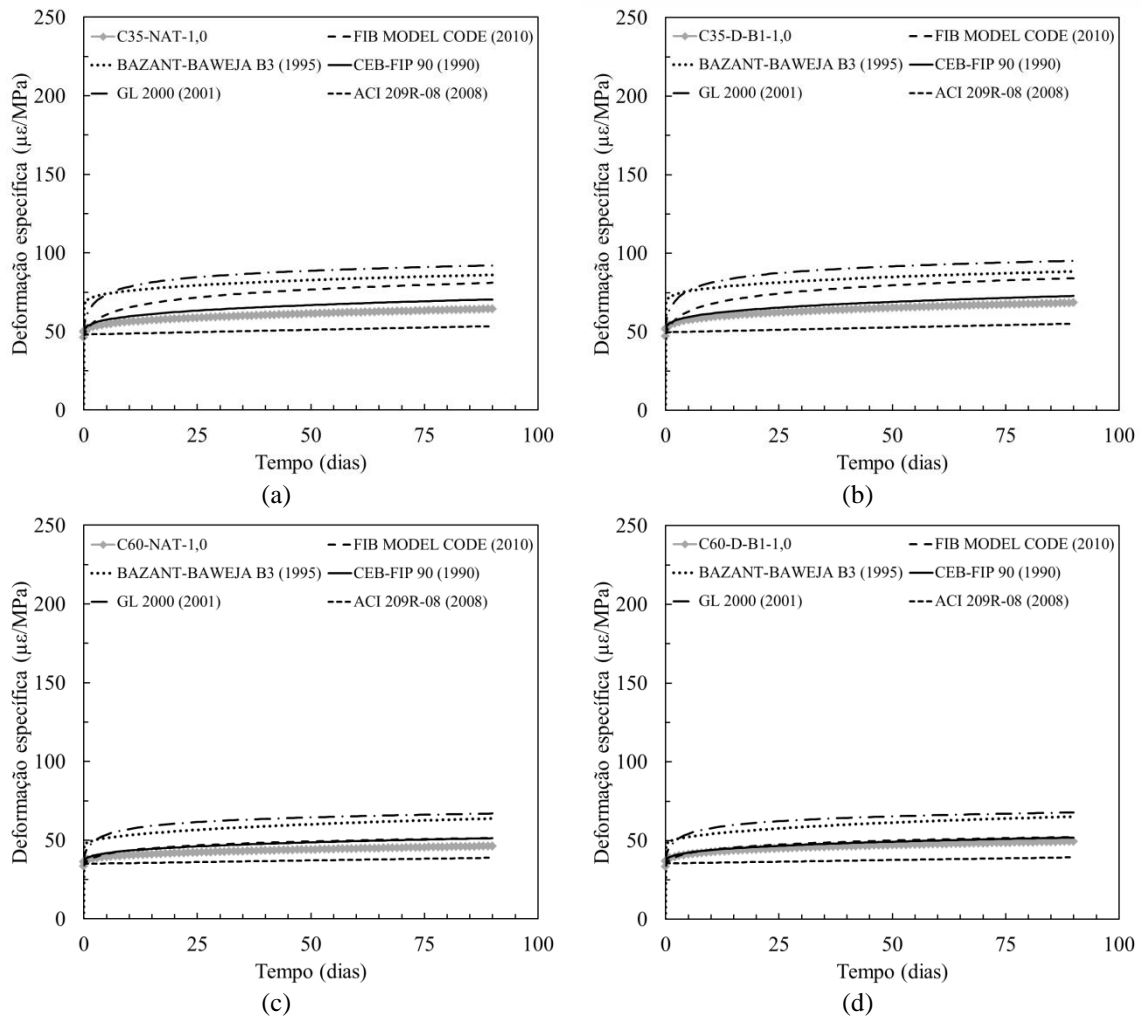
Em todos os modelos, é possível calcular o módulo de elasticidade no momento da aplicação da carga, mas foi observado que as equações propostas superestimam os valores de módulo de elasticidade. Dessa forma, foi considerado o módulo de elasticidade experimental obtido no ensaio de fluência para a previsão das deformações específicas.

Nota-se que, para os concretos com baixo grau de hidratação, os valores calculados pelos modelos apresentam grande dispersão entre eles, onde os modelos BAZANT-BAWEJA B3 (1995), GL2000 (2001) e FIB MODEL CODE (2010) tendem a superestimar os valores de deformação específica dos concretos desse estudo, tanto para os reciclados quanto para os naturais, de ambas as classes de resistência. É possível observar que, para os concretos carregados com baixo grau de hidratação, o modelo CEB-FIP 90 (1990) foi o que mais se aproximou do comportamento apresentado experimentalmente. Ainda, o modelo ACI 209-R-08 (2008) também pode ser considerado adequado para a previsão do comportamento desses concretos.

Comparando-se a capacidade de previsão dos modelos do comportamento de fluência dos concretos naturais e reciclados, observa-se que o modelo CEB-FIP 90 (1990) tende a apresentar maior precisão para descrever o desenvolvimento da fluência nos concretos naturais, em ambas as classes de resistência.

Em relação à comparação entre os modelos de previsão e as curvas experimentais dos concretos carregados com alto grau de hidratação apresentados na Figura 7.10, é possível perceber que a dispersão entre as curvas previstas pelos modelos é bem menor que as apresentadas para os concretos de baixo grau de hidratação. Mais uma vez, o CEB-FIP 90 (1990) foi o modelo que apresentou a maior capacidade de previsão para o comportamento de fluência na compressão de concretos carregados com alto grau de hidratação. Nesse caso, esse modelo foi capaz de prever tanto o comportamento de concretos naturais quanto dos concretos reciclados.

Para os concretos de alta resistência, o modelo FIB MODEL CODE (2010) também foi capaz de apresentar grande precisão na estimativa da curva de fluência. E assim como nos concretos de baixo grau de hidratação, os modelos BAZANT-BAWEJA B3 (1995) e GL2000 (2001) superestimaram as deformações por fluência, nas duas classes de resistência.

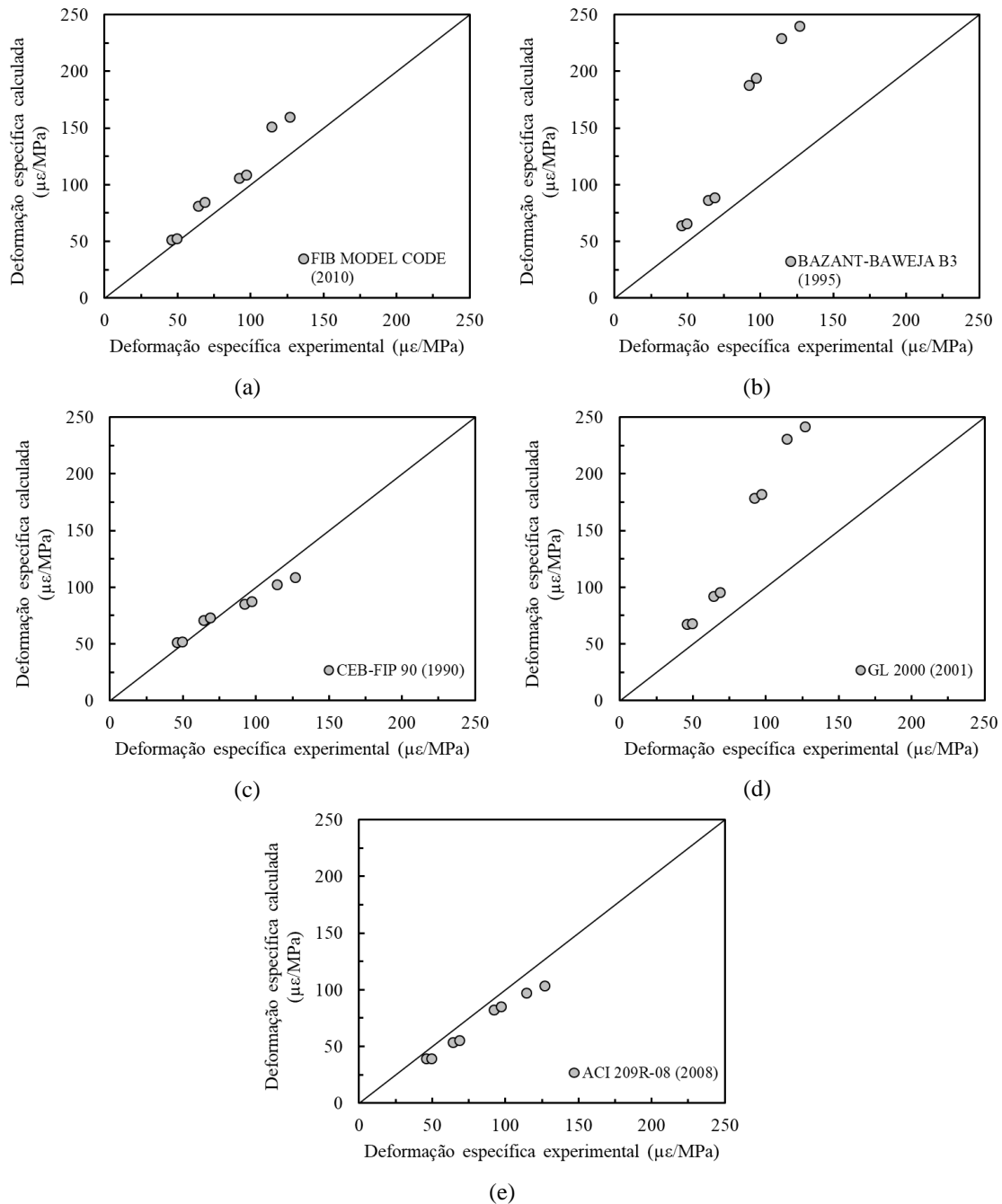


**Figura 7.10 – Comparação entre as curvas de deformação elástica + fluência básica no tempo e as curvas previstas pelos modelos de previsão da literatura: (a) C35-NAT-1,0; (b) C35-D-B1-1,0; (c) C60-NAT-1,0 e (d) C60-D-B1-1,0**

Por fim, a Figura 7.11 apresenta uma comparação entre os valores experimentais de deformação específica (deformação elástica + fluência básica) aos 90 dias e os valores calculados para cada um dos concretos, separados por modelo de previsão. Através desses gráficos, é possível notar que, de fato, os modelos FIB MODEL CODE (2010), CEB-FIP 90 (1990) e ACI 209-R-08 (2008) apresentaram grande capacidade de previsão das deformações por fluência. Já os modelos BAZANT-BAWEJA B3 (1995) e GL 2000 (2001) superestimaram os valores de deformação específica aos 90 dias de carregamento, principalmente para os concretos com maiores deformações.

Essas conclusões são semelhantes às obtidas por SILVA *et al.* (2015). Os autores avaliaram a capacidade de previsão destes mesmos modelos para o comportamento de fluência de concretos com agregados reciclados. Para isso, eles realizaram uma ampla revisão da literatura e selecionaram dados obtidos experimentalmente em diversas

publicações para utilizar como *input* nestes modelos. Entre estas variáveis estavam o fator a/c, a resistência à compressão aos 28 dias, o teor de cimento utilizado, o tempo de cura, entre outros. De acordo com os autores, os modelos de BAZANT-BAWEJA B3 (1995) e GL2000 (2001) apresentaram baixos coeficientes de correlação (0,40 e 0,43), enquanto o modelo ACI 209R forneceu um coeficiente de 0,71, mostrando que este modelo é capaz de estimar o comportamento de fluência de concretos reciclados com precisão. Já o modelo CEB-FIP apresentou resultados similares ao ACI 209R.



**Figura 7.11 – Comparação entre a deformação específica experimental aos 90 dias e a calculada pelos modelos: (a) FIB MODEL CODE (2010), (b) BAZANT-BAWEJA B3 (1995), (c) CEB-FIP 90 (1990), (d) GL 2000 (2001) e (e) ACI 209R-08 (2008)**

#### ***7.4. Conclusões do capítulo***

Portanto, esse capítulo apresentou os resultados experimentais do estudo de fluência básica na compressão em concretos reciclados com duas idades de carregamento, e a comparação desses resultados com modelos de previsão disponíveis na literatura. As principais conclusões desse capítulo são listadas a seguir:

- As deformações por fluência foram maiores nos concretos de resistência normal do que nos concretos de alta resistência. Além disso, os concretos reciclados apresentaram maiores deformações tanto no período de carregamento quanto no período após o descarregamento. De fato, as deformações específicas por fluência são inversamente proporcionais ao módulo de elasticidade do concreto. Nesse caso, o concreto reciclado com resistência normal e carregado com baixo grau de hidratação foi o que apresentou o menor valor de módulo de elasticidade e, conseqüentemente, as maiores deformações por fluência.

- A recuperação por fluência também foi maior para os concretos reciclados nas duas classes de resistência, porém isso não foi suficiente para que a deformação permanente 30 dias após o descarregamento fosse menor para os concretos reciclados. Assim, os concretos reciclados apresentaram uma deformação residual maior que os concretos naturais, tanto para os concretos de resistência normal quanto para os concretos de alta resistência.

- De uma forma geral, os modelos de previsão existentes na literatura apresentam grande dispersão de valores calculados para as deformações de fluência, principalmente para os concretos carregados com baixas idades. Em idades mais avançadas, essa variação tende a diminuir e os modelos estimam valores cada vez mais próximos entre eles.

- O modelo CEB-FIP 90 (1990) foi considerado o mais adequado para a previsão das curvas de fluência durante o período de carregamento, para as duas classes de resistência e para as duas idades de carregamento. Apesar de subestimar ligeiramente as deformações de fluência, o modelo ACI 209-R-08 (2008) também é capaz de estimar os valores de deformação específica dos concretos desse estudo. Além disso, para os concretos de alta resistência e carregados com alto grau de hidratação, o modelo FIB MODEL CODE (2010) também pode ser utilizado com bastante precisão.

- Por fim, os modelos BAZANT-BAWEJA B3 (1995) e GL 2000 (2001) superestimaram os valores de deformação específica aos 90 dias de carregamento, principalmente para os concretos com maiores deformações. Esse fato também foi confirmado por outros autores.

## *Capítulo 8*

# *Conclusões e sugestões para trabalhos futuros*

### *8.1. Conclusões*

Portanto, esse estudo avaliou os principais efeitos das propriedades físicas de agregados reciclados de concreto (ARC) de diferentes origens nas propriedades do estado fresco (reologia e hidratação) e de longa duração (fluência e retração) de concretos reciclados. Ele foi dividido em três importantes etapas. Na primeira, foi realizado o processamento e beneficiamento de aproximadamente 21 toneladas de resíduos de concreto de três fontes de origem, a partir dos quais foram produzidos e caracterizados experimentalmente os agregados graúdos reciclados desse estudo. Na segunda etapa, foram realizadas as dosagens dos principais concretos da pesquisa, através do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), onde foram consideradas as propriedades individuais dos materiais para a composição das misturas. Ainda nessa etapa, foi realizada a caracterização física e mecânica dos concretos desenvolvidos nessa fase. Já na terceira etapa, foram avaliadas as propriedades reológicas, de hidratação e as deformações por retração e fluência nos concretos naturais e reciclados e comparadas com modelos de previsão existentes na literatura. Toda a metodologia empregada foi fundamental para que fossem obtidas as principais conclusões desse estudo, enunciadas nos itens a seguir:

- A qualidade do resíduo de concreto de origem é essencial para a determinação das proporções das frações granulométricas dos agregados reciclados. Agregados provenientes de concretos jovens tendem a apresentar maior quantidade de areia em sua composição, enquanto os agregados gerados a partir de concretos de idades mais avançadas apresentam maior quantidade de agregados graúdos. Apesar disso, em todos os resíduos, a quantidade de agregado reciclado gerado (agregado graúdo e miúdo) foi superior a 90%. Isso mostra que os resíduos de concreto apresentam um grande

potencial para serem reciclados na forma de agregados para a produção de novos concretos.

- A identificação de um parâmetro para controle de qualidade (isto é, o teor de argamassa aderida) foi fundamental para relacionar as principais propriedades dos agregados reciclados (absorção total de água e massa específica), ou seja, agregados que apresentam um alto teor de argamassa aderida, tendem a apresentar uma elevada absorção de água e uma baixa massa específica. Dessa forma, é possível classificar os agregados reciclados em classes, com base em suas principais propriedades. Essa classificação visa diminuir a heterogeneidade do resíduo, que passa a ser avaliado dentro de quatro classes propostas.

- O Modelo de Empacotamento Compressível e a metodologia de compensação de água de absorção dos agregados reciclados se mostraram adequados para a composição dos concretos desse estudo, comprovado através dos resultados de trabalhabilidade e resistência à compressão aos 28 dias.

- A origem dos agregados reciclados mostrou ter influência no comportamento sob compressão axial, principalmente nos concretos de resistência normal. A presença de uma argamassa aderida de melhor qualidade nos agregados reciclados do resíduo de laboratório, comprovada pelos resultados do parâmetro “p” do Modelo de Empacotamento Compressível, ocasionaram maiores valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, quando comparados com os resultados das misturas produzidas com resíduo de demolição.

- O volume total de argamassa presente nos concretos apresentou forte correlação com as principais propriedades dos concretos, como por exemplo, a absorção total e a massa específica. Esse indicador está relacionado com o teor de argamassa aderida aos grãos, parâmetro esse que já se mostrou fundamental para a classificação dos agregados reciclados.

- O comportamento reológico no estado fresco foi descrito de forma bem consistente pelo modelo de *Bingham*. De fato, todos os concretos apresentaram um comportamento linear de cisalhamento, descrito através das curvas de torque medido em função da velocidade de rotação.

- O ensaio de abatimento de tronco de cone se mostrou insuficiente para a caracterização reológica dos concretos e serviu apenas como um parâmetro superficial



para a avaliação da reologia. Concretos com os mesmos resultados nesse ensaio apresentaram comportamentos reológicos bem distintos, descritos pelos parâmetros do modelo de *Bingham* (tensão de escoamento e viscosidade plástica).

- Os resultados de elevação adiabática de temperatura mostraram que o desenvolvimento da hidratação nos concretos de alta resistência foi mais lento do que nas misturas de resistência normal, nas primeiras horas de ensaio. Isso foi atribuído a maior quantidade de aditivo superplastificante presente nos concretos da classe C60 que pode ter retardado o início das reações de hidratação. Apesar disso, após 100 horas, todos os concretos já tinham alcançado 100% da sua elevação adiabática máxima.

- O modelo proposto por WALLER (1999) não demonstrou uma boa previsão dos valores de elevação adiabática dos concretos desse estudo. Esse modelo utiliza os valores da composição de Bogue para definir cada fase presente no clínquer. Porém, alguns autores já questionaram a precisão desse método para a determinação da composição dos clínqueres industriais que já se mostrou bastante duvidoso e limitado, principalmente em relação ao C<sub>3</sub>S. Assim, foi proposto um fator para ajuste do modelo que melhor se adequou aos resultados experimentais obtidos.

- Não foi observada nenhuma relação entre a origem e a fração granulométrica dos agregados reciclados e o comportamento dos concretos durante os ensaios do estado fresco, ou seja, nos ensaios de reologia e elevação adiabática de temperatura. O método de dosagem científica adotado, aliado a uma adequada compensação de água de absorção dos agregados reciclados foram fundamentais para que as propriedades da pasta de cimento fossem mantidas constantes entre todos os concretos de cada classe de resistência.

- A cura interna proporcionada pelos agregados reciclados foi confirmada através dos ensaios de retração autógena, onde os concretos produzidos com o agregado mais poroso (RCA\_L\_B1) foram os que apresentaram os menores valores de retração autógena para as duas classes de resistência desse estudo. Os poros presentes nesse agregado funcionaram como pequenos reservatórios de água, liberando gradativamente essa água armazenada para as reações de hidratação do cimento.

- O volume total de argamassa (ou seja, a soma de argamassa aderida aos agregados reciclados com a argamassa nova) se mostrou um parâmetro-chave no desenvolvimento da retração de concretos. Assim como ele, o índice de vazios também apresentou grande

correlação com os resultados obtidos experimentalmente. Os valores de retração total para os concretos reciclados de resistência normal foram bem próximos dos obtidos para o concreto natural. Assim, a utilização de agregados reciclados parece contribuir positivamente para o controle da fissuração de longa duração provocada por deformações de retração autógena e por secagem dos concretos.

- Em relação aos modelos de previsão, observou-se que o FIB MODEL CODE (2010) foi capaz de estimar a retração por secagem dos concretos desse estudo com mais precisão. Para a retração autógena, nenhum dos dois modelos citados pode ser considerado eficiente na previsão dessa propriedade, independentemente da classe de resistência do concreto. Em relação à retração total, o FIB MODEL CODE (2010) e o GL2000 (2001) foram os modelos considerados mais adequados para a previsão da dessa propriedade, independente da classe de resistência dos concretos.

- As deformações por fluência foram maiores nos concretos de resistência normal do que nos concretos de alta resistência. Além disso, os concretos reciclados apresentaram maiores deformações tanto no período de carregamento quanto no período após o descarregamento. De fato, as deformações específicas por fluência são inversamente proporcionais ao módulo de elasticidade do concreto. Além disso, a recuperação por fluência também foi maior para os concretos reciclados nas duas classes de resistência, porém isso não foi suficiente para que a deformação permanente 30 dias após o descarregamento fosse menor para os concretos reciclados. Assim, os concretos reciclados apresentaram uma deformação residual maior que os concretos naturais, tanto para os concretos de resistência normal quanto para os concretos de alta resistência.

- Os modelos CEB-FIP 90 (1990) e ACI 209-R-08 (2008) foram considerados os mais adequados para a previsão das curvas de fluência durante o período de carregamento, para as duas classes de resistência e para as duas idades de carregamento.

Assim, tornam-se evidentes as relevantes contribuições desse estudo, principalmente no que diz respeito ao conhecimento das deformações sofridas por concretos reciclados tanto no estado fresco, quanto as de longa duração. Os resultados mostraram que a combinação de um processamento adequado dos resíduos e a utilização de um método de dosagem compatível com agregados reciclados foram fundamentais para que as propriedades apresentadas pelos concretos reciclados desenvolvidos permitissem a sua aplicação em larga escala, onde o parâmetro-chave para a classificação dos agregados

reciclados é o teor de argamassa aderida e não a sua fonte de origem ou classe granulométrica.

## ***8.2. Sugestões para trabalhos futuros***

Nesse trabalho foram investigadas as propriedades de agregados reciclados provenientes de três concretos de origem distintas: produzido em laboratório, resíduo de usina de concreto e resíduo de demolição. Como sugestão, poderiam ser avaliados também os agregados reciclados gerados a partir de resíduos de concreto de pavimentação, visto que grande parte da malha rodoviária brasileira apresenta condições de pavimentação insatisfatórias e em muitos casos, necessitam de reconstrução. Além disso, apesar desse estudo ter proposto um parâmetro de qualidade para classificar os agregados de resíduos de concreto baseado no teor de argamassa aderida, poderia ser avaliado o custo-benefício para a implementação de técnicas que tenham como objetivo remover essa argamassa envelhecida, tornando as propriedades dos agregados reciclados mais próximas dos agregados naturais.

Apesar da utilização do Modelo de Empacotamento Compressível ter sido fundamental para as contribuições desse trabalho, o método do Volume Equivalente de Argamassa também poderia ter sido utilizado, de forma a comparar o comportamento dos concretos dosados por esses dois métodos de dosagem, principalmente nas propriedades do estado endurecido. Esse último método considera a quantidade de cada uma das fases existentes no agregado reciclado e ajusta a quantidade de agregado graúdo e argamassa do novo concreto para atingir o mesmo volume de argamassa de uma mistura feita totalmente com agregados naturais.

Em relação à avaliação das propriedades reológicas, sugere-se a realização de ensaios complementares, como o ensaio de VeBe, além da investigação do comportamento reológico de concretos reciclados autoadensáveis, visando ampliar o conhecimento a respeito das propriedades reológicas do estado fresco em concretos reciclados.

Quanto ao estudo da hidratação em concretos reciclados, seria interessante a complementação do estudo de elevação adiabática de temperatura com a realização de ensaios mecânicos em diferentes idades, de forma a acompanhar a evolução da resistência ao longo do tempo. Além disso, o desenvolvimento da hidratação também poderia ser avaliado através de ensaio de velocidade do pulso ultrassônico, onde a

velocidade varia conforme a porosidade do concreto diminui, refletindo assim o desenvolvimento das reações de hidratação do cimento.

Por fim, em relação às propriedades de longa duração, sugere-se a realização dos ensaios de fluência na compressão por um maior período de tempo, tanto na fase de carregamento, quanto na fase de descarregamento. Também poderiam ser estudadas a influência da secagem nas deformações de fluência, através da realização de ensaios em corpos de prova não selados, e a avaliação dessa propriedade em amostras pré-fissuradas.

## *Referências Bibliográficas*

- ABBAS, A. *et al.*, 2009, “Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis”, **Materials characterization**, 60, n. 7, pp. 716-728.
- ABRECON, 2015, “Panorama das usinas de reciclagem de RCD no Brasil: A pesquisa setorial ABRECON 2014/2015”, **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição**, São Paulo, Brasil.
- ABRELPE, 2015, “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015”, **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**, São Paulo, Brasil.
- ACI Committee 209, **ACI 209.1R-05**, “Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2005.
- ACI Committee 209, **ACI 209R-08**. “Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete”, Michigan, USA: American Concrete Institute; 2008. 48 p.
- ACI Committee 209, **ACI 209R-92**, “Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures”, 1992.
- AKBARNEZHAD, A., ONG, K. C. G., ZHANG, M. H., TAM, C. T., FOO, T. W. J., 2011, “Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates”, **Construction and Building Materials**, n. 25, v. 8, pp. 3469-3479.
- AL-BAYATI, H.K.A. *et al.*, 2016, “Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate”, **Construction and Building Materials**, 112, pp. 284-298.

- AMARIO, M. *et al.*, 2017, “Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model”, **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 83-92.
- AMARIO, M., 2015, “Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC)”, **Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 213 p.
- AMER, A.A.M. *et al.*, 2016, “Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates”, **Construction and Building Materials**, 123, pp. 300-308.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 12819**, “Concreto e argamassa — Determinação da elevação adiabática da temperatura — Método de ensaio”, Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15116**, “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos”, Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5739**, “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7215**, “Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão”, Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7222**, “Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7809**, “Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio”, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8224**, “Concreto endurecido — Determinação da fluência – Método de ensaio”, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8522**, “Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão”, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9778**, “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 18**, “Cimento Portland – Análise química - Determinação de perda ao fogo”, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 248**, “Agregados - Determinação da composição granulométrica”, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 30**, “Determinação da absorção de água em agregados miúdos”, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 51**, “Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “*Los Angeles*””, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 52**, “Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente”, Rio de Janeiro, 2009.

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

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 67**, “Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”, Rio de Janeiro, 1998.
- BAIRAGI, N. K., VIDYADHARA, H. S., RAVANDE, K., 1990, “Mix design procedure for recycled aggregate concrete”, **Construction and Building Materials**, v. 4, n. 4, pp. 188-193.
- BANFILL, P.F.G., 2006, “Rheology of fresh cement and concrete”, **Rheology reviews**, p. 61-130.
- BAZANT, Z.P., BAWEJA, S., 1995, “Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3”, **Mater. Struct.**, 28, pp. 357-365.
- BEHERA, M. *et al.*, 2014, “Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete— A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review”, **Construction and Building Materials**, 68, pp. 501-516.
- BERGSDAL, H., BOHNE, R. A., & BRATTEB, H., 2007, “Projection of construction and demolition waste in Norway”, **Journal of Industrial Ecology**, n. 11, v. 3, pp. 27-39.
- BRAND, A.S., ROESLER, J.R., SALAS, A., 2015, “Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete”, **Construction and Building Materials**, 79, pp. 83-89.
- BRAVO, M. *et al.*, 2015, “Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants”, **Construction and Building Materials**, 77, pp. 357-369.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2004, “Eurocode 2: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings”. **British Standards Institution**.



- CARETTE, J., STAQUET, S., 2016, “Monitoring and modelling the early age and hardening behaviour of eco-concrete through continuous non-destructive measurements: Part II. Mechanical behavior”, **Cement and Concrete Composites**, 73, pp. 1-9.
- CARRO-LÓPEZ, D. *et al.*, 2015, “Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates”, **Construction and Building Materials**, 96, pp. 491-501.
- CARRO-LÓPEZ, D. *et al.*, 2017, “Proportioning, Microstructure and Fresh Properties of Self-compacting Concrete with Recycled Sand”, **Procedia Engineering**, 171, pp. 645-657.
- CASTELO BRANCO, V. T. F., MASAD, E., LITTLE, D. N., SOARES, J. B., MOTTA, L. M. G., 2006, “Caracterização de forma, angularidade e textura de agregado de brita granítica e escórias de aciaria usando o Aggregate Imaging System (AIMS)”, In: **XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes-ANPET**.
- CEB-FIP, 1990, “Model code for concrete structures”, **Comite Euro-International du Beton**, Lausanne, Switzerland, 88.
- CEN - Comite Europeen de Normalization, **EN-1992-1-1**, “Eurocode 2 - design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings”, Belgium, 2008.
- CHAUBE, R., KISHI, T., & MAEKAWA, K., 2014, “Modelling of concrete performance: Hydration, microstructure and mass transport”, CRC Press.
- COELHO, A., DE BRITO, J., 2012, “Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings”, **Waste Management**, 32, n. 3, pp. 532-541.

- COELHO, A.; DE BRITO, J., 2013, “Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal–Part I: Energy consumption and CO2 emissions”, **Waste management**, 33, n. 5, pp. 1258-1267.
- CONAMA, 2002, “Resolução CONAMA nº 307”, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 5 de julho de 2002.
- COSTA, E. B. D., 2013, “Aproveitamento do resíduo de anodização do alumínio na produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico”, Dissertação de mestrado, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**.
- COSTA, U., URSELLA, P., 2003, “Construction and demolition waste recycling in Italy”, In: **International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction**, Vol. 5, pp. 231-239.
- DE LARRARD, F. *et al.*, 1994, “Design of a rheometer for fluid concretes”, **Proceedings of the International RILEM workshop Special Concretes: Workability and Mixing**, pp. 201-208.
- DE LARRARD, F., 1999, “Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach”, **Modern Concrete Technology Series**, vol. 9, E&FN SPON, London.
- DE LARRARD, F., FERRARIS, C.F., SEDRAN, T., 1998, “Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material”, **Materials and Structures**, 31, n. 7, pp. 494-498.
- DESHPANDE, N., LONDHE, S., KULKARNI, S., 2014, “Modeling compressive strength of recycled aggregate concrete by Artificial Neural Network, Model Tree and Non-linear Regression”, **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 2, pp. 187-198.
- DODDS, W. *et al.*, 2017, “Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress”, **Construction and Building Materials**, 145, pp. 183-195.

- ECKERT, M.; OLIVEIRA, M., 2017, “Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology”, **Construction and Building Materials**, 133, pp. 416-424.
- EPA, 2014, “Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures Report”, **Environmental Protection Agency** <<https://www.epa.gov/smm/advancing-sustainable-materials-management-facts-and-figures-report>> [último acesso em Maio/2017].
- EUROSTAT, 2014, “Waste Statistics”, **Eurostat Statistics Explained** <[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics)> [último acesso em Maio/2017].
- FALESCHINI, F. *et al.*, 2014, “Rheology of fresh concretes with recycled aggregates”, **Construction and Building Materials**, 73, pp. 407-416.
- FARIA, E. D., 2004, “Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados”, **Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE**, Rio de Janeiro.
- FATHIFAZL, G. *et al.*, 2011, “Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate”, **Cement and Concrete Composites**, 33, pp. 1026-1037.
- FATHIFAZL, G., ABBAS, A., RAZAQPUR, A. G., ISGOR, O. B., FOURNIER, B., FOO, S., 2009, “New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate”, **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 10, pp. 601-611.
- FIB MODEL CODE, 2010, First complete draft. **Bulletin**, 65.
- FOLINO, P., XARGAY, H., 2014, “Recycled aggregate concrete–mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression”, **Construction and Building Materials**, 56, pp. 21-31.

- GARDNER, N.J., LOCKMAN, M.J., **GL2000**, 2001, “Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete”, **ACI Materials Journal**, 98, pp. 159-167.
- GAYARRE, F.L. *et al.*, 2014, “The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete”, **Construction and Building Materials**, 53, pp. 260-266.
- GHOLAMPOUR, A., & OZBAKKALOGLU, T., 2018, “Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates”, **Engineering Structures**, v. 157, pp. 224-234.
- GOBBO, L. D. A., 2003, “Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld”, Dissertação de mestrado, **Universidade de São Paulo**.
- GÓMEZ-SOBERÓN, J. M., 2002, “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study”, **Cement and concrete research**, n. 32, v. 8, pp. 1301-1311.
- GONZALEZ-COROMINAS, A., ETXEBERRIA, M., 2016, “Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete”, **Construction and Building Materials**, 115, pp. 32-41.
- GONZÁLEZ-TABOADA, I *et al.*, 2017, “Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology”. **Journal of Cleaner Production**, 156, pp. 1-18.
- GÜNEYISI, E. *et al.*, 2014, “Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates”, **Construction and Building Materials**, 64, pp. 172-183.

- GÜNEYISI, E. *et al.*, 2016, “Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates”, **Construction and Building Materials**, 113, pp. 622-630.
- GUO, H., SHI, C., GUAN, X., ZHU, J., DING, Y., LING, T. C., WANG, Y., 2018, “Durability of recycled aggregate concrete – a review”, **Cement and Concrete Composites**, v. 89, pp. 251-259.
- HANIF, A. *et al.*, 2017, “Early-age behavior of recycled aggregate concrete under steam curing regime”, **Journal of Cleaner Production**, 152, pp. 103-114.
- HEWLETT, P., 2003, “Lea's chemistry of cement and concrete”, **Butterworth-Heinemann**, Ed.4.
- HIETE, M., 2013, “Waste management plants and technology for recycling construction and demolition (C&D) waste: state-of-the-art and future challenges”, In: **Handbook of recycled concrete and demolition waste**, pp. 55-75.
- HU, C., DE LARRARD, F., 1996, “The rheology of fresh high-performance concrete”, **Cement and Concrete Research**, 26(2), pp. 283–294.
- HU, C., DE LARRARD, F., SEDRAN, T., BOULAY, C., BOSC, F., DEFLORENNE, F., 1996, “Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete”, **Materials and Structures**, v. 29, n. 10, pp. 620-631.
- JENSEN, O. M., & LURA, P., 2006, “Techniques and materials for internal water curing of concrete”, **Materials and Structures**, v. 39, n. 9, pp. 817-825.
- JIANG, C., YANG, Y., NI, T., & WANG, X., 2015, “Correlating strength of concrete to its early-age temperature rise”, **Magazine of Concrete Research**, v. 67, n. 23, pp. 1274-1286.
- JIAO, D., SHI, C., YUAN, Q., AN, X., LIU, Y., LI, H., 2017, “Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete - A review”, **Cement and Concrete Composites**, v. 83, pp. 146-159.

- KIM, K., SHIN, M., CHA, S., 2013, "Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability", **Construction and Building Materials**, 48, pp. 499-507.
- KISKU, N. *et al.*, 2017, "A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material", **Construction and Building Materials**, 131, pp. 721-740.
- KOENDERS, E.A.B, PEPE, M., MARTINELLI, E., 2014, "Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates", **Cement and Concrete Research**, 56, pp. 203-212.
- KOENDERS, E.A.B., 1997, "Simulation of volume changes in hardening cement-based materials", **Ph.D. Thesis - Delft University of Technology**, Delft.
- KOU, S., POON, C., 2015, "Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete", **Construction and Building Materials**, 77, pp. 501-508.
- LATIF AL-MUFTI, R., FRIED, A.N., 2016, "Pulse velocity assessment of early age creep of concrete", **Construction and Building Materials**, 121, pp. 622-628.
- LIU, J., SHI, C., MA, X., KHAYAT, K. H., ZHANG, J., & WANG, D., 2017, "An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials", **Construction and Building Materials**, v. 146, pp. 702-712.
- LLATAS, C., 2013, "Methods for estimating construction and demolition (C&D) waste". In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y.; DE BRITO, J., **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 47, Woodhead Publishing Limited, pp. 25-52, Philadelphia, USA.

- LOTFY, A., AL-FAYEZ, M., 2015, "Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate", **Cement and Concrete Composites**, 61, pp. 36-43.
- LYE, C.Q. *et al.*, 2016, "Creep strain of recycled aggregate concrete", **Construction and Building Materials**, 102, pp. 244-259.
- MAHMOODZADEH, F., CHIDIAC, S.E., 2013, "Rheological models for predicting plastic viscosity and yield stress of fresh concrete", **Cement and Concrete Research**, 49, pp. 1-9.
- MANZI, S., MAZZOTTI, C., BIGNOZZI, M.C., 2013, "Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate", **Cement and Concrete Composites**, 37, pp. 312-318.
- MARUYAMA, I., & SATO, R., 2005, "A trial of reducing autogenous shrinkage by recycled aggregate", In Proc., **4th International Seminar on Self-Desiccation and its Importance in Concrete Technology**, pp. 264-270.
- MARZOUK, M., AZAB, S., 2014, "Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics", **Resources, conservation and recycling**, 82, pp. 41-49.
- MEDJIGBODO, S., BENDIMERAD, A. Z., ROZIÈRE, E., & LOUKILI, A., 2018, "How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties?", **Cement and Concrete Composites**, v. 86, pp. 72-86.
- MEFTEH, H. *et al.*, 2013, "Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete", **Journal of Cleaner Production**, 54, pp. 282-288.
- MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., 2008, "Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais", **IBRACON**, tradução da 3ª edição em inglês, v.1:III, São Paulo, SP, Brasil.

- MERCANTE, I.T. *et al.*, 2012, “Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study”, **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 17, n. 2, pp. 232-241.
- MIRANDA, L.F.R., ANGULO, S.C.; CARELI, E.D., 2009, “A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008”, **Ambiente Construído**, 9, n. 1, pp. 57-71.
- MONTERO, J., LASERNA, S., 2017, “Influence of effective mixing water in recycled concrete”, **Construction and Building Materials**, 132, p. 343-352.
- NEVILLE, A.M., 1995, “Properties of concrete”, **Longman Group UK**, Ed. 4.
- ORTIZ, O., PASQUALINO, J. C., CASTELLS, F., 2010, “Environmental performance of construction waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain”, **Waste management**, n. 30, v. 4, pp. 646-654.
- PANDURANGAN, K., DAYANITHY, A., PRAKASH, S.O., 2016, “Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete”, **Construction and Building Materials**, 120, pp. 212-221.
- PEDRO, D., DE BRITO, J., EVANGELISTA, L., 2014, “Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete”, **Construction and Building Materials**, 71, pp. 141-151.
- PEPE, M. *et al.*, 2014, “Structural concrete made with recycled aggregates: Hydration process and compressive strength models”, **Mechanics Research Communications**, 58, pp. 139-145.
- PEPE, M. *et al.*, 2016, “A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete”, **Construction and Building Materials**, 122, pp. 362-372.
- PEPE, M., 2015, “A conceptual model for designing recycled aggregate concrete for structural applications”, **Springer**.



- PEPE, M., TOLEDO FILHO, R.D., KOENDERS, E.A., 2014, “Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete”, **Construction and Building Materials**, 69, pp. 124-132.
- PEREIRA, L., JALALI, S., AGUIAR, J., 2004, “Construction and demolition waste management”, In: **Workshop Integrated Management Systems for Specific Waste Streams**, Lisbon, Portugal.
- QUATTRONE, M. *et al.*, 2016, “Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production?”, **Construction and Building Materials**, 123, pp. 690-703.
- RANGEL, C. S., TOLEDO FILHO, R. D., AMARIO, M., PEPE, M., POLISSENI, G. C., DE ANDRADE, G. P., 2019, “Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study”, **Journal of Cleaner Production**, v. 208, pp. 589-601.
- RANGEL, C.S. *et al.*, 2017, “Tension stiffening approach for interface characterization in recycled aggregate concrete”, **Cement and Concrete Composites**, v. 82, pp. 176-189.
- RANGEL, C.S., 2015, “Influência de agregados graúdos reciclados nas propriedades estruturais de concretos de resistência normal e de alto desempenho”, **Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 204 p.
- REIXACH, F., BARROSO, J., CUSCO, A., 2000, “Waste Management Plan in Construction and Demolition Works”, **General Direction of the Environment**, Institute of Construction Technology of Catalonia, Spain (em espanhol).
- SEARA-PAZ, S. *et al.*, 2016, “Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates. Creep and shrinkage”, **Construction and Building Materials**, 122, pp. 95-109.

- SHEN, D. et al., 2016, “Influence of curing temperature on autogenous shrinkage and cracking resistance of high-performance concrete at an early age”, **Construction and Building Materials**, 103, pp. 67-76.
- SHI, C. *et al.*, 2016, “Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review”, **Journal of Cleaner Production**, 112, pp. 466-472.
- SILVA, E.F, 2007, “Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração”, **Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 332 p.
- SILVA, R. V., DE BRITO, J., DHIR, R. K., 2018, “Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review”, **Construction and Building Materials**, 178, pp. 19-31.
- SILVA, R.V., DE BRITO, J., DHIR, R.K., 2014, “Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production”, **Construction and Building Materials**, 65, pp. 201-217.
- SILVA, R.V., DE BRITO, J., DHIR, R.K., 2015a, “Comparative analysis of existing prediction models on the creep behaviour of recycled aggregate concrete”, **Engineering Structures**, 100, pp. 31-42.
- SILVA, R.V., DE BRITO, J., DHIR, R.K., 2015b, “Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: a review”, **Construction and Building Materials**, 77, pp. 327-339.
- SOMNA, R., JATURAPITAKKUL, C., AMDE, A.M., 2012, “Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete”, **Cement and Concrete Composites**, 34, n. 7, pp. 848-854.
- SONAWANE, T.R., PIMPLIKAR, S.S., 2013, “Use of recycled aggregate in concrete”, **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, pp. 52-59.

- SOUALHI, H. *et al.*, 2017, “New model to estimate plastic viscosity of eco-friendly and conventional concrete”, **Construction and Building Materials**, 135, pp. 323-334.
- SPAETH, V., TEGGUER, A.D., 2013, “Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments”, **International Journal of Sustainable Built Environment**, 2, n. 2, pp. 143-152.
- TAM, V. W., TAM, C. M., WANG, Y., 2007, “Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach”, **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 10, pp. 1928-1939.
- TAM, V.W.Y., KOTRAYOTHAR, D., XIAO, J., 2015, “Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete”, **Construction and Building Materials**, 100, pp. 262-272.
- TAYLOR, H. F. W., 1992, “Cement Chemistry”, **London: Thomas Telford**, 459p.
- THOMAS, J., THAICKAVIL, N. N., WILSON, P. M., 2018, “Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates”, **Journal of Building Engineering**, v. 19, pp. 349-365.
- ULUBEYLI, S., KAZAZ, A., ARSLAN, V., 2017, “Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues”, *Procedia Engineering*, 172, pp. 1190-1197.
- VAN BREUGEL, K., 1991, “Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials”, **Ph.D. Thesis - Delft University of Technology**, Delft, 295 p.
- VERIAN, K. P., ASHRAF, W., CAO, Y., 2018, “Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production”, **Resources, Conservation And Recycling**, 133, pp. 30-49.

- WALLER, V., 1999, “Relation entre composition, exothermie en cours de prise et résistance en compression des bétons”, Doctoral dissertation, Thèse de doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris (em français).
- WALLEVIK, J.E., 2006, “Relationship between the Bingham parameters and slump”, **Cement and Concrete Research**, 36, pp. 1214-1221.
- WU, L., FARZADNIA, N., SHI, C., ZHANG, Z., & WANG, H., 2017, “Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review”, **Construction and Building Materials**, v. 149, pp. 62-75.
- XIAO, J. *et al.*, 2013, “Effects of interfacial transition zones on the stress–strain behavior of modeled recycled aggregate concrete”, **Cement and Concrete Research**, 52, pp. 82-99.
- YANG, S., & LIM, Y., 2018, “Mechanical strength and drying shrinkage properties of RCA concretes produced from old railway concrete sleepers using by a modified EMV method”, **Construction and Building Materials**, v. 185, pp. 499-507.
- YILDIRIM, S.T., MEYER, C.; HERFELLNER, S., 2015, “Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze–thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates”, **Construction and Building Materials**, 91, pp. 288-296.
- ZEGA, C.J., DI MAIO, A.A., 2009, “Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature”, **Construction and Building Materials**, 23, n. 5, pp. 2047-2052.
- ZHANG, J., TAYLOR, P.C., SHI, C., 2015, “Investigation of Approaches for Improving Interfacial Transition Zone-Related Freezing-and-Thawing Resistance in Concrete Pavements”, **ACI Materials Journal**, 112, n. 5.
- ZHANG, M. H., TAM, C. T., & LEOW, M. P., 2003, “Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete”, **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, pp. 1687-1694.